

## Capability of Digital Shearography in Crack Defect Inspection

Mohamad Tizmaghz Nejad, Davood Akbari\*, Shobeir Ghobadi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\*daakbari@modares.ac.ir

### Abstract

This paper introduces and reviews digital shearography applications in the detection and measurement of crack type defects in materials. Digital shearography is a laser light-based NDT method for full-field and non-contact measurement of an object deformation (surface displacement derivatives). This method is equivalent to a full-area strain gauge that allows you to observe the strain distribution over a large area. Shearography is used to inspect and non-destructive evaluation of different materials. However, because of some advantages of shearography compared to traditional methods in the evaluation of some materials like composites, and on the other hand, the popularity of these structures in important industries such as aerospace and military, shearography is increasingly being considered. Regarding understanding the significance and influences of the shape and geometry of defects in shearography results, this article attempts to prove and introduce digital shearography as a superior method in the field of both quantitative and qualitative evaluation of sub-cracks in various materials by reviewing previous studies and research. As concluded from previous research the loading, shear distance and direction, crack length, depth, and angle have the most influence on the results and fringe patterns formation. Shearography ability to estimate crack geometry has also been demonstrated and proven.

**Keywords:** Shearography, Nondestructive Testing (NDT), Defect measurement, Defect detection, Crack

## قابلیت روش برش‌نگاری دیجیتال در تشخیص ناپیوستگی‌های نوع ترک

محمد تیزمغزنازاد، داود اکبری\*، شبیر قبادی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
\*daakbari@modares.ac.ir

### چکیده

این مقاله به معرفی و بررسی کاربردهای روش برش‌نگاری دیجیتال در زمینه تشخیص و اندازه‌گیری عیب ترک و فعالیت‌های انجام شده در این حوزه می‌پردازد. برش‌نگاری دیجیتال یک روش نوین مبتنی بر نور لیزر است که برای اندازه‌گیری تمام-میدانی و غیرتماسی تغییرشکل‌های صفحه‌ای (مشتقات جابه‌جایی سطح) مورد استفاده و توسعه قرار گرفته است. این روش معادل یک کرنش‌سنج تمام‌ناحیه‌ای عمل می‌کند که امکان مشاهده توزیع کرنش در یک ناحیه بزرگ را فراهم می‌نماید. از برش‌نگاری جهت بازرسی و ارزیابی غیرمخرب مواد مختلف استفاده می‌شود. با توجه به برتری‌های برش‌نگاری در مقایسه با روش‌های سنتی در بازرسی برخی از مواد مانند مواد مرکب و از سوی دیگر کاربرد روزافزون این مواد در صنایع حساس نظیر هوافضا و صنایع نظامی، برش‌نگاری به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. با علم بر اهمیت شکل و هندسه ناپیوستگی‌ها در نتایج آزمون برش‌نگاری، در این مقاله با تکیه بر مرور مطالعات و پژوهش‌های قبلی، سعی در اثبات و معرفی برش‌نگاری دیجیتال به عنوان یک روش برتر در زمینه ارزیابی ترک‌ها در مواد مختلف به‌صورت کمی و کیفی، شده است. نتایج تحقیقات بررسی شده نشان می‌دهد که عواملی چون اندازه بارگذاری، اندازه و جهت برش، اندازه، عمق و زاویه ترک بیشترین تاثیر را در تشکیل هاله‌ها و نتایج دارند. همچنین، قابلیت برش‌نگاری در تخمین هندسه ترک نیز نمایش داده شده و به اثبات رسیده است.

**واژگان کلیدی:** برش‌نگاری، آزمون‌های غیرمخرب، اندازه‌گیری عیوب، تشخیص عیب، ترک

### ۱- مقدمه

بازرسی برخی مواد نظیر مواد مرکب، کاربرد و توسعه روش‌های نوین بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. تداخل‌سنجی لیزری یا برش‌نگاری دیجیتال یک روش بازرسی و اندازه‌گیری تمام‌میدانی مناسب جهت محاسبه دقیق مشتقات جابه‌جایی سطح است که دارای سرعت تشخیص بالا و قابلیت تشخیص انواع عیوب سطحی و زیرسطحی در مواد مختلف است. این روش که با نام تداخل‌سنجی برشی الگوی لکه‌ای<sup>۱</sup> هم شناخته می‌شود، امکان ارزیابی قطعات به صورت غیرتماسی و تمام‌ناحیه‌ای را فراهم می‌کند. برش‌نگاری دیجیتال دارای برتری‌های زیادی نسبت به سایر روش‌های غیرمخرب و نوری است، از جمله این مزایا می‌توان به غیرتماسی بودن، عدم نیاز به باریکه نور مرجع و اندازه‌گیری مستقیم کرنش‌های سطحی اشاره نمود که در نتیجه، سرعت بالا و کاهش حساسیت

یکی از مشکلاتی که همواره در صنعت وجود دارد، امکان وجود عیوب و ناپیوستگی‌های غیرقابل مشاهده در داخل مواد و قطعات است که ممکن است خواص مکانیکی و عملکرد آتی قطعه را تحت تاثیر قرار دهد. ترک‌ها از غیرقابل قبول و خطرناک‌ترین عیوب رایج در صنعت هستند، چرا که تنش‌ها در اطراف ترک متمرکز شده و منجر به کاهش استحکام و عمر قطعه و در نتیجه شکست آن می‌گردند. همچنین ترک‌های ناشی از خستگی امکان دارد در حین سرویس‌دهی قطعه کار به وجود آیند که در پی این ترک‌ها کارکرد مجموعه دچار مشکل می‌شود. بنابراین وجود یک روش بازرسی با سرعت و دقت بالا، قابل حمل و قابل استفاده در محیط کار، بدون آسیب زدن به قطعه یا مجموعه، از اهمیت فراوانی برخوردار است. با توجه به محدودیت آزمون‌های غیرمخرب مرسوم در

<sup>1</sup> Speckle Pattern Interferometry

این کار آن‌ها نمونه را در خلاء قرار داده و گرادیان جابه-جایی ایجاد شده را در سطح بررسی کردند. وجود گرادیان شدید جابه‌جایی سطحی در مناطق معیوب، منشاء اصلی کاربرد روش برش‌نگاری در یافتن عیوب توسط این محققین و سایر محققین پس از آنان است. بدین ترتیب، با انجام بارگذاری در نمونه دارای عیب و بررسی گرادیان‌های جابه‌جایی خارج از صفحه، عیوب خود را به شکل هاله‌های فشرده در تصاویر برش‌نگاری نشان می‌دهند [۷].

تا قبل از تکامل سنسورهای CCD، ابزار تصویربرداری در روش برش‌نگاری دوربین‌های عکاسی بود و تصاویر را بر روی فیلم عکاسی ذخیره می‌کردند که اصطلاحاً برش-نگاری سنتی نامیده می‌شود. برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ ناکادانا و یاتاگایی به جای ضبط تصاویر بر روی فیلم‌های عکاسی، از دوربین الکترونیکی و تصویر دیجیتالی استفاده نمودند. استفاده از ثبت دیجیتالی تصاویر و پردازنده‌های رایانه‌ای برای تحلیل و پردازش تصاویر، برش‌نگاری سنتی را به سمت برش‌نگاری دیجیتالی سوق داد [۸]. آزمون برش‌نگاری با استفاده از نور لیزر با طول موج‌های متفاوت، توسط کاستل و همکاران انجام شد [۹]. مزایای عمده برش‌نگاری دیجیتالی از جمله سرعت بسیار بالاتر، هزینه-های پایینتر و قابلیت مکانیزه کردن سیستم باعث شد که این روش به سرعت جایگزین برش‌نگاری سنتی گردد.

هانگ تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تئوری برش-نگاری و برخی از کاربردهای آن مخصوصاً در صنایع لاستیک‌سازی ارائه کرد. وی در مقاله‌ای که سال ۱۹۸۲ منتشر نموده است، اصول تشکیل هاله‌های برش‌نگاری، روش اندازه‌گیری کرنش‌های سطحی و همچنین کاربرد این روش در انجام آزمون‌های غیرمخرب در صنایع لاستیک‌سازی و صنایع هوافضا را مطرح کرد. او همچنین به مقایسه کامل روش‌های برش‌نگاری و تمام‌نگاری پرداخت و نشان داد که در انجام آزمون‌های غیرمخرب، روش برش‌نگاری مزایای بیشتری نسبت به تمام‌نگاری فراهم می‌کند [۱۰].

تحقیقات زیادی در حوزه استفاده از برش‌نگاری در تشخیص عیوب در مواد مختلف صورت گرفته که بیشتر بر روی عیوب جدایش بین‌لایه‌ای و حفره‌های ایجاد شده بین آن‌ها متمرکز بوده و اما ارزیابی ترک‌های زیرسطحی به دلیل دشوار بودن شناسایی آن‌ها کمتر مورد بررسی

چیدمان برش‌نگاری به ارتعاشات محیطی را فراهم می‌نماید. این خصوصیات سبب کاربرد و توسعه روز افزون برش‌نگاری دیجیتالی در صنایع مختلف از جمله صنایع نظامی، هوافضا، خودروسازی و پزشکی گردیده است. از این رو توسعه و اثبات قابلیت‌های این روش برای مواد گوناگون و عیوب مختلف به شدت مورد توجه قرار گرفته است [۱۱][۲].

اساس روش برش‌نگاری بر مبنای تداخل دو جبهه نور لیزر بازتاب شده از سطح جسمی است که در معرض تابش نور تک رنگ لیزر قرار گرفته است. طی این فرایند پرتوهای نور بازتاب شده از سطح نمونه پس از عبور از دستگاه تداخل‌گر مایکلسون وارد دوربین<sup>۱</sup> CCD شده و تصویری لکه‌ای به‌وجود می‌آید که با ثبت تصاویری قبل و بعد از بارگذاری نمونه و کم کردن آن‌ها از یکدیگر، تصویر نهایی به شکل یک الگوی هاله‌ای<sup>۲</sup> حاصل می‌شود که هاله‌های ایجاد شده نشان‌دهنده نواحی هم کرنش در سطح جسم هستند. با استفاده از عملیات پردازش تصاویر و شناخت روابط حاکم بر اصول برش‌نگاری، می‌توان به اطلاعات کمی و مفیدی از ارتباط هاله‌ها با کرنش‌های سطحی دست یافت [۳].

برش‌نگاری بر اساس تحقیقات لیندرتز در راستای توسعه روش نوری تمام‌نگاری<sup>۳</sup> در سال ۱۹۷۰ به‌وجود آمد که ابتدا تداخل‌سنجی الگوی لکه‌ای نام داشت. وی از این روش جهت محاسبه مشتقات جابجایی سطح در راستای عمود بر صفحه استفاده نمود. سه سال بعد برای نخستین بار توسط لیندرتز و باترز در سال ۱۹۷۳ از این روش جهت اندازه‌گیری ممان خمشی در تیر استفاده شد. در این کار آن‌ها ابتدا میزان شیب سطح را با استفاده از این روش تعیین کرده و سپس میزان ممان خمشی در یک سطح نازک را به دست آوردند. نکته قابل توجه در این پژوهش، استفاده از تداخل‌گر مایکلسون برای ایجاد تصویر برشی بود [۶].

توه و همکاران از روش برش‌نگاری برای مشخص کردن ابعاد و عمق عیوب در ورق‌های کامپوزیتی زمینه پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه استفاده نمودند. در

<sup>1</sup> Charged Coupled Device

<sup>2</sup> Fringe Pattern

<sup>3</sup> Holography

استفاده شد که امکان تهیه دو تصویر برش‌نگاری در دو راستا را تنها در یک مرحله عکس‌برداری به‌وجود می‌آورد [۱۵]. در پژوهشی دیگر، یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی پارامترهای مهم و تاثیرگذار در روش برش‌نگاری دیجیتال مانند نوع و مقدار بارگذاری، اندازه برش، جهت برش و موقعیت عیب پرداختند. در بخشی از آن مطالعه، با توجه به این که جهت برش بیشتر در نقص‌های دارای اشکال نامتقارن نظیر ترک و شیار اهمیت دارد، عیوبی به صورت خطی در قطعه‌ای از جنس آلومینیوم ایجاد نمودند. طبق نتایجی که حاصل شد، زمانی که جهت‌های برشی عمود بر جهت عیب باشند، شاهد بهبود نتایج آزمون خواهیم شد [۱۶].

در تحقیقی توسط آقاجعفری و اکبری عیوب تحت بار به شکل دایره در اندازه و عمق‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. آنها از بارگذاری حرارتی برای تحریک نمونه‌های از جنس پلی‌اتیلن استفاده نمودند. در این تحقیق اثر اندازه بارگذاری و فاصله برش بر روی نتایج مشخص شد [۱۷]. تیزمغزناژاد و همکاران ترک‌های زیرسطحی دارای طول و زوایای متفاوت را در نمونه‌هایی از جنس پلیمر با بکارگیری روش برش‌نگاری و استفاده از بارگذاری حرارتی تشخیص دادند. آنها اذعان داشتند که هرچه زاویه بین جهت برش و جهت ترک عمودتر باشد، تشخیص عیب راحت‌تر خواهد بود [۱۸]. در پژوهشی دیگر توسط ایشان، این بار ترک‌های داخلی را در دو نوع کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه مورد بازرسی قرار دادند. آنها متوجه شدند که جنس الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌ها بر نتایج و کیفیت هاله‌ها تاثیرگذار است [۱۹].

آسمانی و همکاران در پژوهشی قابلیت روش برهم‌نگاری لیزری را به منظور عیب‌یابی قطعات بررسی نمودند. در این تحقیق، آنها از نور لیزر جهت ایجاد الگوی لکه‌ای استفاده نمودند. آنها عیب زیرسطحی موجود در نمونه‌ای از جنس پلی‌پروپیلن را با این روش تشخیص دادند و همچنین کرنش‌های خارج از صفحه را اندازه‌گیری نمودند [۲۰].

بناکار و اکبری در مطالعه‌ای مروری با تمرکز بر جنس مواد مورد آزمایش، فعالیت‌های انجام شده در این زمینه را مورد بحث و نتیجه‌گیری قرار دادند [۲۱].

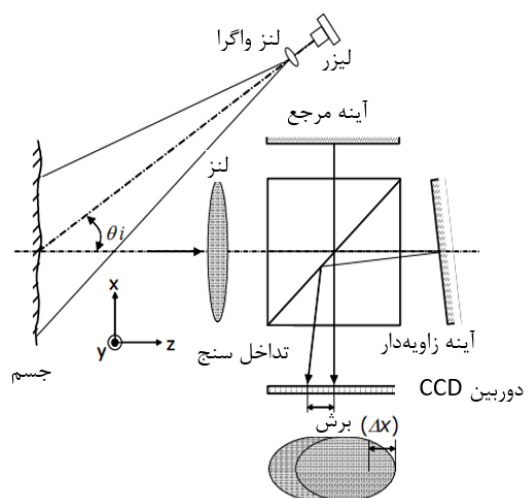
قرار گرفته‌اند و نیاز به مطالعه بیشتری دارند. از اولین کسانی که برش‌نگاری را برای بازرسی ترک به‌کار برده است، می‌توان به آقای هانگ و همکاران اشاره کرد. ایشان در خلال پژوهش جامعی که در سال ۱۹۹۶ بر روی بازرسی غیرمخرب عیوب گوناگون در مواد مرکب به‌وسیله برش‌نگاری انجام دادند، علاوه بر بررسی عیوب رایج صفحه‌ای، در بخشی از تحقیقاتشان عیب ترک را در پره‌های توربین ساخته شده از کامپوزیت‌های دارای ماتریس گرافیتی، شناسایی نمودند. همچنین در یک نمونه کامپوزیتی دیگر ترک ماتریسی را با موفقیت تشخیص دادند. لازم به ذکر است که در این فعالیت‌ها از بارگذاری حرارتی جهت تحریک نمونه‌های موردنظر استفاده نمودند [۱۱].

در پژوهش دیگری که توسط یانگ و همکاران در سال ۱۹۹۸ انجام شده است، جسم مورد مطالعه یک صفحه فولادی می‌باشد که از همه جهات به‌صورت مستحکم مقید شده است. چهار عیب به صورت شیارهایی در پشت قطعه ایجاد گشته است. صفحه با فرکانس‌های مختلف تحت بارگذاری ارتعاشی قرار گرفته و نتایج برش‌نگاری با روش زمان میانگین مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند [۱۲].

در سال ۲۰۰۷ آقای لیوینگ استون و همکارانشان با استفاده از برش‌نگاری به عنوان یک روش آزمون غیرمخرب، عمق، اندازه و جهت رشد ترک‌ها را در بتن‌ها و سازه‌های بتنی بدست آورده‌اند [۱۳]. در پژوهش دیگری توسط آقای معتمدی، ایشان توانایی و کاربرد روش برش‌نگاری را در بازرسی و ارزیابی میکروترک‌های سطحی و زیرسطحی در ویفرهای سیلیکونی نشان دادند. در این پژوهش از دو نوع بارگذاری فشاری و حرارتی جهت بازرسی نمونه‌ها استفاده نمودند [۱۴].

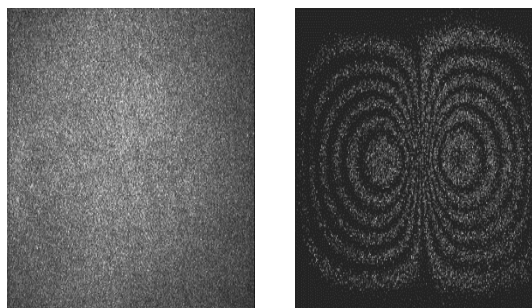
یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار در بازرسی ترک‌ها، جهت برش می‌باشد از این رو وانگ و همکاران در ۲۰۱۶ با علم به وابستگی جهت برش به جهت عیوب در برش‌نگاری، در عیب‌های نامتقارن مانند ترک‌ها و شیارها، چیدمان جدیدی را ارائه کردند که قابلیت اندازه‌گیری کرنش در دو جهت عمود بر هم را به‌صورت همزمان فراهم می‌نمود. در این چیدمان جدید از یک دوربین CCD، دو عدد لیزر و همچنین دو دستگاه تداخل‌گر مایکلسون برای ایجاد دو تصویر برشی در دو راستای عمود بر هم  $x$  و  $y$

می‌گردد. شکل ۱ چیدمان و اجزاء روش برش‌نگاری را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- شماتیکی از چیدمان برش‌نگاری [۲۲]

در این روش قطعه دارای عیب تحت نوعی از بارگذاری قرار گرفته و به‌وسیله چیدمان مذکور، تصاویر الگوی لکه‌ای قبل و بعد از بارگذاری توسط دوربین CCD از سطح نمونه ثبت می‌شود. با تفریق این تصاویر از همدیگر، یک الگوی هاله‌ای تشکیل می‌شود، این الگوها نشان دهنده نقاط هم کرنش و محل عیوب می‌باشند. در نقاطی که قطعه دارای نقص می‌باشد، این عیوب به‌صورت ایجاد ناپیوستگی در هاله‌ها پدیدار می‌شوند. با بررسی فاز الگوهای هاله‌ای، می‌توان به اطلاعات کمی از گرادیان جابه‌جایی خارج از صفحه دست پیدا کرد. بر همین اساس اندازه‌گیری کمی عیوب و کرنش سطح جسم با استفاده از تکنیک‌های استخراج فاز قابل محاسبه می‌باشد [۲۲]. در شکل ۲ تصویری از الگوهای لکه‌ای و هاله‌ای نشان داده شده است.



شکل ۲- تصویر الگوی هاله‌ای در سمت راست و الگوی لکه‌ای در سمت چپ [۲]

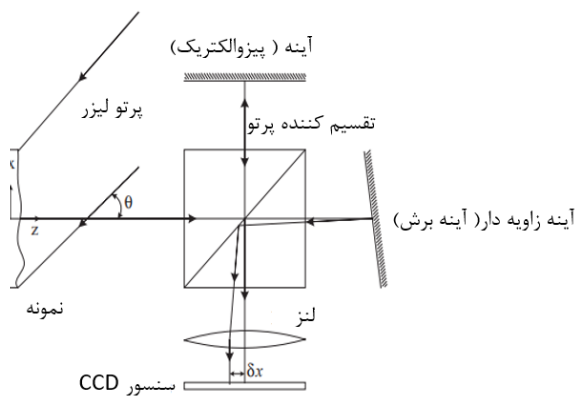
همانطور که از مطالعه پژوهش‌های گذشته می‌توان نتیجه گرفت، ترک‌ها به دلیل ساختار ریز و کوچک آن‌ها از دشوارترین نوع عیوب و ناپیوستگی‌های موجود در مواد جهت تشخیص هستند که بسیار خطرناک می‌باشند. همچنین عمده تحقیقات مرتبط قبلی بر مرور و بررسی توسعه روش برش‌نگاری و قابلیت‌های آن در ارزیابی مواد مختلف و عیوب صفحه‌ای متمرکز بوده است. لذا در این مطالعه سعی شده است، ضمن معرفی اصول و مبانی برش‌نگاری، قابلیت‌های این روش به‌طور خاص در شناسایی و اندازه‌گیری ترک‌ها در مواد مختلف، با تکیه بر مرور فعالیت‌های گذشته، مورد بررسی و اثبات قرار بگیرد. همچنین تفاوت و تاثیر سطوح تخت و منحنی در ارزیابی ترک‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- اصول و مبانی روش برش‌نگاری

### ۲-۱- شرح روش

برش‌نگاری دیجیتال یک روش نوری بر پایه اصول تداخل‌سنجی نور لیزر می‌باشد که برای اندازه‌گیری تمام-میدانی و غیرتماسی کرنش‌های صفحه‌ای مورد استفاده و توسعه قرار گرفته است. این روش معادل یک کرنش‌سنج تمام‌میدانی عمل می‌کند که امکان مشاهده توزیع کرنش در یک ناحیه بزرگ را فراهم می‌نماید. در این روش دو جبهه نور بازتاب شده از سطح جسمی که در معرض تابش یک باریکه نور تک رنگ لیزر قرار گرفته است، وارد دستگاه تداخل‌سنج می‌شود و توسط دو آینه ثابت (مرجع) و متحرک باهمدیگر تداخل می‌کنند. حاصل این عملیات یک الگوی لکه‌ای است. تصویر نهایی، حاصل تفاضل شدت نور ذخیره شده تصاویر لکه‌ای قبل و بعد از بارگذاری یا تغییرشکل جسم مورد ارزیابی است که بعد از عملیات پردازش تصویر، یک تصویر هاله‌دار از سطح نمونه ایجاد می‌گردد. هاله‌های ایجاد شده نشان‌دهنده نواحی هم کرنش در سطح جسم می‌باشند.

در برش‌نگاری برای روشن نمودن سطح نمونه از نور لیزر تک رنگ، و جهت پراکنده ساختن نور لیزر بر روی سطح قطعه موردنظر به‌صورت یکنواخت، از عدسی واگراکننده استفاده می‌شود. جهت ایجاد تداخل و تشکیل الگوی لکه‌ای از یک مجموعه برشی تداخل‌سنج استفاده



شکل ۳- شماتیک تداخل سنج مایکلسون اصلاح شده [۳۵]

### ۲-۳- معادلات حاکم

تداخل گر مایکلسون الگوهایی را ایجاد می کند که با شدت های مختلف بر روی پرده تشکیل می گردد که این تغییرات در الگوها به اختلاف فاز بستگی دارد. اختلاف فاز دو موج ناشی از اختلاف مسیرهای نوری (از منبع تا نقطه تداخل)، برابر است با  $\phi$  یا  $\Delta\phi$ :

$$\phi = 2\pi \frac{2d_1 - 2d_2}{\lambda} \quad (1)$$

که در آن  $\lambda$  طول موج لیزر به کار رفته می باشد و  $d_1$  و  $d_2$  بازوهای تداخل سنج مایکلسون می باشند. شدت نور ثبت شده در صفحه دوربین ( $I$ )، ناشی از تداخل دو تصویر برش خورده برابر خواهد بود با:

$$I = I_0 [1 + \gamma \cdot \cos \phi] \quad (2)$$

که در آن  $I$  شدت نور تداخلی،  $I_0$  شدت نور متوسط زمینه،  $\gamma$  مدول تداخل و  $\phi$  اختلاف فاز تصادفی بین تصاویر برش خورده در هر نقطه می باشد.

با ایجاد هرگونه جابه جایی سطحی در نمونه، اختلاف اندک مسیر موج تا صفحه دوربین باعث به وجود آمدن اختلاف فاز امواج رسیده شده در هر نقطه از تصویر و تغییر شدت نور تصویر می گردد. پس از اعمال تنش و در نتیجه ایجاد تغییر شکل سطحی در نمونه، شدت نور تداخلی در هر نقطه به صورت رابطه زیر تغییر می کند:

$$I' = I_0 [1 + \gamma \cdot \cos(\phi + \Delta)] \quad (3)$$

که در این رابطه  $I'$  شدت نور تداخلی در هر نقطه از الگوی لکه ای و  $\Delta$  تغییر فاز در اثر تغییر شکل نسبی ناشی از تنش اعمالی می باشد. با محاسبه اختلاف بین شدت نور

برای بارگذاری یا تحریک قطعه کار به منظور ایجاد جابه جایی سطحی در نمونه مورد نظر، روش های متنوعی وجود دارد. بارگذاری کششی، فشاری، حرارتی، خلاء و ارتعاشی از مرسوم ترین روش های موجود جهت تحریک نمونه می باشند. عوامل تاثیرگذار در نتایج برش نگاری شامل نوع و اندازه بارگذاری، اندازه و جهت برش، اندازه و عمق ترک می باشند. پارامترهای اصلی و قابل تنظیم برش نگاری شامل اندازه بارگذاری، اندازه برش و جهت برش می باشد که برای جنس و عیب های مختلف، مقادیر مختلفی می تواند داشته باشد. چنانچه این مقادیر در محدوده ای خارج از مقدار بهینه اعمال شوند تصاویر و هاله های برش نگاری دچار ناهمبستگی<sup>۱</sup> و نویز شدید می شوند و همین امر باعث می شود نتایج دقت و صحت کافی را نداشته باشند. لذا نمی توان از مقادیر مورد استفاده برای یک جنس با ابعاد مشخص، برای بررسی جنسی دیگر با هندسه متفاوت استفاده نمود [۲۳].

### ۲-۲- تداخل گر

در روش برش نگاری، به منظور ایجاد تداخل از یک وسیله برش گر که بین قطعه و دوربین قرار می گیرد استفاده می شود. این وسیله دو تصویر روی هم افتاده با فاصله جانبی و یا "برش خورده" از قطعه را بر روی صفحه دوربین ایجاد می کند. ابزارهای برشی متنوعی وجود دارند نظیر گوه شیشه ای، منشور فرنسل، تداخل گر ماخ زندر و تداخل گر مایکلسون که در این میان تداخل گر مایکلسون اصلاح شده به علت سهولت در عملکرد و تنظیم آسان پارامترهای فاصله و جهت برش، نسبت به سایر روش ها متداول تر می باشد [۲۳]. در شکل ۳ چیدمان تداخل گر مایکلسون شامل عدسی، آینه ها، شکافنده پرتو نور و لیزر را به صورت شماتیک نشان داده شده است. همان طور که از شکل پیدا است، یک پرتو نور لیزر با عبور از دو عدسی که هر کدام اثر پخش کنندگی بر روی پرتو دارند، به صورت یک موج تخت در آمده و در جداکننده نور به دو موج تبدیل می شود که این امواج پس از برخورد با دو آینه  $M_1$  و  $M_2$  دوباره در جداکننده ترکیب می شوند. بخشی از این موج ترکیب شده به سمت دوربین سوق داده می شود و در نتیجه، تداخل دو موج در صفحه دوربین ضبط می گردد.

<sup>1</sup> Decorrelation

پس از اعمال تغییرشکل اندک به سطح نمونه، نقطه  $P$  به نقطه  $P'(x+u, y+v, z+w)$  منتقل می‌گردد که  $(u, v, w)$  بردار جابه‌جایی در نقطه  $P$  می‌باشد. مبدا مختصات در سطح نمونه و جهت  $Z$  در راستای عمود بر سطح در نظر گرفته شده است [۲۶].

تغییر مسیر نوری طی شده از نقطه  $P$  در اثر تغییرشکل مکان برابر است با:

$$\Delta L_p = (SP' + P'S) - (SP + PD) \quad (5)$$

که در آن طول هر یک از مسیرهای نوری برابر است با:

$$SP = ((x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2)^{1/2}$$

$$SD = ((x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 + (z - z_D)^2)^{1/2}$$

$$SP' = ((x + u - x_s)^2 + (y + v - y_s)^2 + (z + w - z_s)^2)^{1/2}$$

$$P'D = ((x + u - x_D)^2 + (y + v - y_D)^2 + (z + w - z_D)^2)^{1/2}$$

در ادامه با استفاده از بسط دو جمله‌ای و صرف نظر از جملات با درجه پایین‌تر داریم:

$$\Delta L_p = \left( \frac{x - x_D}{R_D} + \frac{x - x_s}{R_s} \right) u + \left( \frac{y - y_D}{R_D} + \frac{y - y_s}{R_s} \right) v + \left( \frac{z - z_D}{R_D} + \frac{z - z_s}{R_s} \right) w \quad (7)$$

که:

$$R_D = (X_D^2 + Y_D^2 + Z_D^2)^{1/2} \quad (8)$$

$$R_s = (X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2)^{1/2}$$

با جایگزینی مقادیر زیر:

$$A = \frac{x - x_D}{R_D} + \frac{x - x_s}{R_s}$$

$$B = \frac{y - y_D}{R_D} + \frac{y - y_s}{R_s} \quad (9)$$

$$C = \frac{z - z_D}{R_D} + \frac{z - z_s}{R_s}$$

داریم:

$$\Delta L_p = Au + Bv + Cw \quad (10)$$

نوری که به نقطه  $D(x_D, y_D, z_D)$  می‌رسد از نقاط  $P$  و  $Q$  بازتاب می‌شود که تغییر طول مسیر نوری ناشی از تغییرشکل برای نقطه  $P$  برابر است با معادله (۱۰). نقطه  $Q$  در فاصله‌ای برابر اندازه برش  $dx$  نسبت به نقطه  $P$  بر روی سطح جسم قرار گرفته است. پس از اعمال تغییرشکل، نقطه  $Q(x+dx, y, z)$  به نقطه  $Q'(x+dx+u+\delta u, y+v+\delta v, z+w+\delta w)$  تغییر مکان خواهد داد که در آن  $w+\delta w$  و  $v+\delta v$  و  $u+\delta u$  اجزای جابه‌جایی در

قبل و بعد از بارگذاری، هاله‌های برش‌نگاری با شدت نور جدید به صورت زیر حاصل می‌گردد:

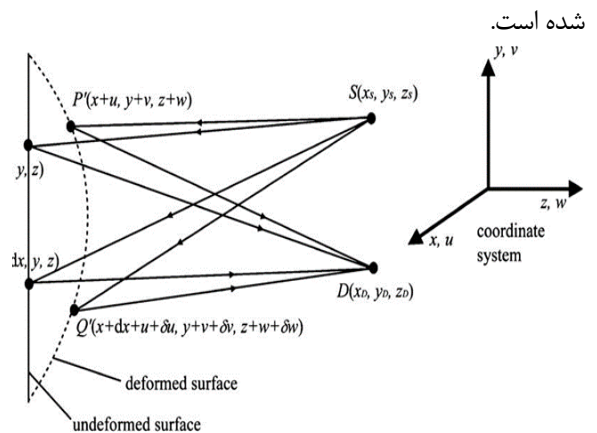
$$I_s = I' - I = 2I_0 \gamma \cdot \sin\left(\varphi + \frac{\Delta}{2}\right) \cdot \sin \frac{\Delta}{2} \quad (4)$$

که در آن شدت نور  $I_s$  در هر پیکسل اندازه‌گیری شده و براساس آن جابه‌جایی سطح به دست خواهد آمد. از آنجا که تصویر نمی‌تواند مقادیر روشنایی منفی اختیار کند، قدرمطلق  $I_s$  برای نمایش الگوی هاله‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۵].

چنانچه  $\Delta = 2N\pi$  که  $N=0,1,2,\dots$  شماره هاله را مشخص می‌کند، مقدار  $I_s$  صفر شده و هاله‌های تاریک مشاهده می‌گردد. بین هر دو هاله تاریک متوالی منطقه روشن (ایجاد می‌گردد) که در نتیجه الگوی حاصل، یک الگوی روشن و تاریک متوالی خواهد بود.

وجود مقدار  $\sin\left(\varphi + \frac{\Delta}{2}\right)$  در معادله (۴) که فاز تصادفی ناشی از تداخل اولیه می‌باشد، باعث پدید آمدن نویز شدیدی در الگوهای هاله‌ای می‌گردد. کاهش کیفیت هاله‌ها در نقاط حساس، موجب دشواری در تمییز الگوهای اصلی می‌گردد. مقداری از نویز ایجاد شده را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف پردازش تصاویر نظیر فیلترینگ کاهش داد.

اختلاف فازی که در روش برش‌نگاری مدنظر است، همان اختلاف فاز امواج رسیده از دو نقطه متفاوت بر روی نمونه می‌باشد که به اندازه فاصله برش در کنار هم قرار دارند. با در نظر گرفتن نقطه  $P(x, y, z)$  بر روی سطح جسم قبل از تغییرشکل، مسیر نوری طی شده از منبع تابش  $S(x_s, y_s, z_s)$  تا نقطه تشکیل تصویر  $D(x_D, y_D, z_D)$  در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- مسیر نوری طی شده از مبدا تابش  $S$  تا نقطه تشکیل تصویر  $D$  در طی دو مسیر نوری برای نقاط قبل و بعد از تغییرشکل [۲۶]

واسطه انجام می‌دهد که این ویژگی‌ها باعث صرف زمان زیادی می‌گردد. با توجه به ماهیت غیرتماسی و تمام-ناحیه‌ای بودن برش‌نگاری، این روش می‌تواند جایگزین مناسب‌تری جهت ارزیابی ترک‌ها و سایر عیوب در مواد فلزی باشد.

ملوین و همکاران در راستای به چالش کشیدن توانایی برش‌نگاری در ارزیابی ترک‌ها در پانلهایی مسطح از جنس مواد فلزی، یک ماتریس آزمایشی بزرگ از پانلهای فولادی و آلومینیومی با نقایص زیرسطحی با اندازه‌های مختلف از ۰/۸ تا ۲۵/۴ میلی‌متر را تحت بارگذاری کششی قرار داده و شیب‌های جابه‌جایی خارج از صفحه را با استفاده از یک چیدمان خارج از صفحه برش‌نگاری اندازه-گیری نمودند. برای اعمال یک بارگذاری کششی یکنواخت و متعام بر روی ترک‌های افقی ایجاد شده توسط ماشینکاری تخلیه الکتریکی در هر کدام از پانلهای آلومینیومی و فولادی با ضخامت ۱ میلی‌متر و ابعاد ۱۵ در ۱۵ سانتیمتری، از یک دستگاه بارگذاری MTS 810 با قابلیت اعمال بار کنترل شده استفاده شد. به ازای هر ۲/۵۴ میکرومتر از تغییر مکان بر اثر بارگذاری اعمال شده بر روی پانل‌ها، یک عکس برش‌نگاری ثبت شد. بارگذاری تا جایی که دیگر هاله‌ها قابل استناد نبودند تکرار گردید. شکل (۵) ماتریس آزمایشی که برای نمونه‌های فولادی و آلومینیومی استفاده شده است را نشان می‌دهد. عکس‌های برش‌نگاری با استفاده از یک دوربین استاندارد ۵۱۲ در ۵۱۲ پیکسل CCD ضبط و به صورت یک صفحه مشبک مفهومی<sup>۱</sup> در رایانه ماکینتاش به صورت دیجیتالی گنجانده شده است [۲۷].

		Crack Length (mm)					
		25.4	12.7	6.4	3.2	1.6	0.8
Shearing Configuration	N1°X	Tested	Tested	Tested	Unresolved	Unresolved	Unresolved
	N1°Y	Tested	Tested	Tested	Unresolved	Unresolved	Unresolved
	Z1°X	Tested	Tested	Tested	Unresolved	Unresolved	Unresolved
	Z1°Y	Tested	Tested	Tested	Unresolved	Unresolved	Unresolved
	N1/8°X	Tested	Tested	Tested	Unresolved	Unresolved	Unresolved
	N1/8°Y	Tested	Tested	Tested	Unresolved	Unresolved	Unresolved
	Z1/8°X	Unresolved	Unresolved	Unresolved	Unresolved	Unresolved	Unresolved
	Z1/8°Y	Unresolved	Unresolved	Unresolved	Unresolved	Unresolved	Unresolved

شکل ۵- ماتریس آزمایشی که برای نمونه آلومینیومی [۲۷]

راستای  $x$  و  $y$  و  $z$  هستند. تغییر مسیر نوری ناشی از تغییر شکل در نقطه  $Q$  برابر خواهد بود با:

$$\Delta L_Q = A(u + \delta u) + B(v + \delta v) + C(w + \delta w) \quad (11)$$

اختلاف تغییر مسیر نوری بین  $P$  و  $Q$  از تفاضل (۱۰) برابر خواهد بود با:

$$\Delta L_Q - \Delta L_P = A \delta u + B \delta v + C \delta w \quad (12)$$

چنانچه اندازه برش  $\delta x$  نسبت به سایر ابعاد تصویر کوچک باشد، تغییر فاز ناشی از تغییر مسیر نوری را می‌توان با رابطه زیر تقریب زد:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \left( A \frac{\partial u}{\partial x} + B \frac{\partial v}{\partial x} + C \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta x \quad (13)$$

ضرایب  $A$ ،  $B$  و  $C$  ضرایب حساسیت هستند که به جهت‌گیری منبع تابش و زاویه مشاهده بستگی دارند. این ضرایب برابر اجزای بردار حساسیت  $k = (k_x, k_y, k_z)$  هستند که این بردار، نیمساز زاویه تابش و بازتابش می‌باشد. بنابراین را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (k_x \frac{\partial u}{\partial x} + k_y \frac{\partial v}{\partial x} + k_z \frac{\partial w}{\partial x}) \delta x \quad (14)$$

چنانچه زوایای تابش و بازتابش تقریباً هم‌راستا بوده و عمود بر سطح نمونه باشند، اندازه اجزای  $k_x$  و  $k_y$  نزدیک صفر بوده و سیستم برش‌نگاری تنها به مشتقات جابه‌جایی خارج از صفحه حساس خواهد بود. در این حالت مشتق جابه‌جایی خارج از صفحه برابر خواهد بود با:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta}{4\pi \delta x} \quad (15)$$

چنانچه برش در راستای  $y$  اعمال گردد، مشتق جابه‌جایی خارج از صفحه برابر است با:

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\lambda \Delta}{4\pi \delta y} \quad (16)$$

بنابراین یکی از مزایای عمده روش برش‌نگاری در مقایسه با سایر روش‌های نوری، قابل تنظیم بودن حساسیت اندازه‌گیری‌ها به وسیله تغییر ساده در جهت و فاصله برش می‌باشد.

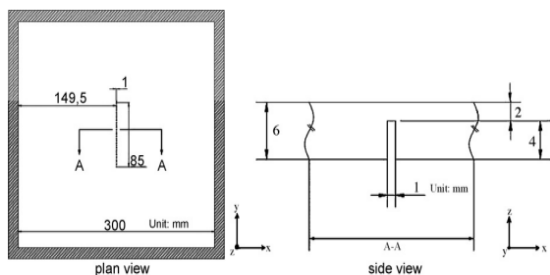
### ۳- کاربرد برش‌نگاری در بازرسی ترک

#### ۳-۱- بازرسی ترک در نمونه‌های فلزی مسطح

یکی از روش‌های سنتی مرسوم در بازرسی ترک‌ها در مواد فلزی، آزمون غیرمخرب فراصوتی می‌باشد که فرایند بازرسی را به صورت نقطه به نقطه و با استفاده از ماده

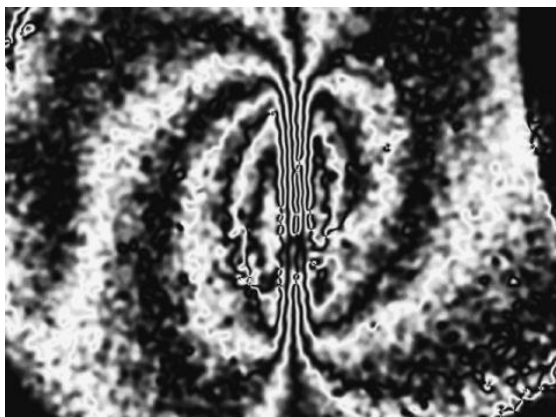
<sup>1</sup> Perceptics frame grabber board





شکل ۷- شماتیک یک صفحه T6-6061 با ترک مهندسی شده [۲۸]

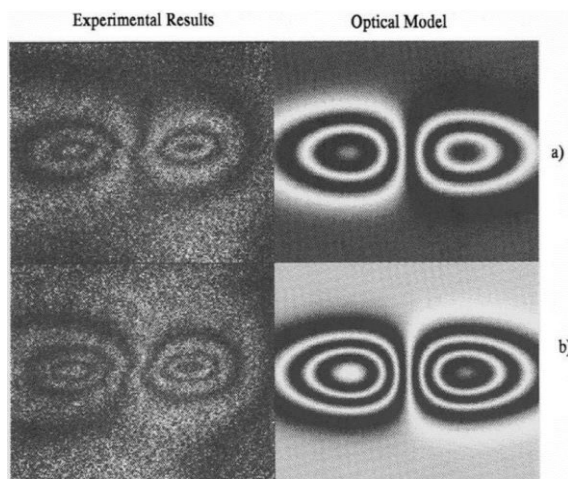
علاوه بر این، یک الگوریتم بازیابی فاز تک فریم نیز با استفاده از تجهیزات سخت افزاری مناسب، جهت به دست آوردن اطلاعات فازی از تغییرشکل گذرا ناشی از بارگذاری حرارتی همانند شکل ۹ پیاده سازی شده است. اطلاعات فاز بازیابی شده نیز در تصویر شکل ۸ قابل دستیابی می باشد. با معلوم بودن مشخصات مواد، نقشه های فازی برای اندازه گیری کمی ترک مفید خواهد بود [۲۸].



شکل ۸- نقشه فاز واپیچیده ترک زیرسطحی در نمونه آلومینیومی [۲۸]

قطعه دیگری با دو ترک هم اندازه اما در عمق های مختلف نیز مورد آزمایش قرار گرفت. ترک A در عمق ۱ میلی متری و ترک B در عمق ۲ میلی متری زیر سطح پانل قرار دارند. تجزیه و تحلیل هاله های برشنگاری نشان می دهد که هرچه ترک به سطح قطعه نزدیکتر باشد، استحکام خمشی موضعی ضعیف تر و تغییرشکل محلی ناشی از حرارت شدیدتر خواهد بود، بنابراین ترک های نزدیکتر به سطح نمونه باعث تراکم بیشتر هاله ها در مقایسه با آنهایی که در عمق بیشتری قرار دارند، می شود.

تمرکز اصلی پژوهش ذکر شده بر مرتبط سازی الگوهای هاله ای مشاهده شده با ویژگی های مکانیکی مهم مانند جابه جایی، تنش و کرنش های مرتبط با تغییرشکل نمونه بود. برای کمی سازی نتایج تجربی، یک مدل المان محدود<sup>۱</sup> با استفاده از یک پکیج نرم افزار تجاری المان محدود COSMOS<sup>TM</sup> جهت شبیه سازی تغییرشکل نمونه ها، طراحی شد. اندازه کوچک ترین ترکی که به وسیله چیدمان مذکور شناسایی گردید، ۳/۲ میلی متر با استفاده از لنز بزرگنمایی به اندازه ۷۰ میلی متر با یک کریستال برشی ۱ درجه بود. شکل ۶ تصاویر هاله ای حاصل از آزمایشات تجربی و شبیه سازی را نشان می دهد که بر اساس تحلیل این هاله ها، تطابق خوبی بین طول ترک های اندازه گیری شده و فاصله بین مراکز دو هاله ناشی از وجود ترک در تصاویر هاله ای برقرار بود.

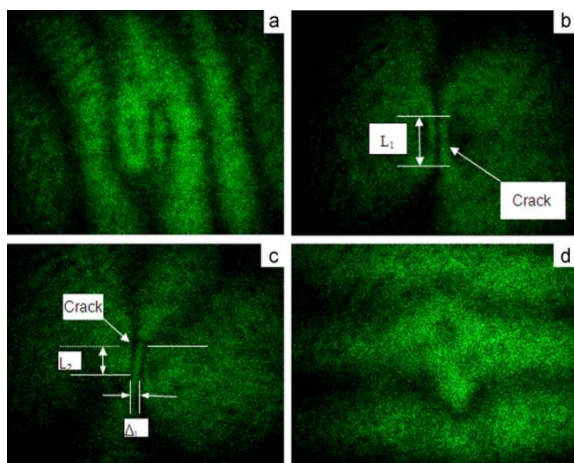


شکل ۶- مدل سازی نوری و نتایج تجربی پانل آلومینیومی با ترک زیرسطحی ۱۲/۷ که به اندازه های (a) ۷/۶۲ میکرومتر و (b) ۱۰/۱۶ میکرومتر تحت جابه جایی قرار گرفته است [۲۷]

برای بررسی قابلیت برشنگاری در بازرسی ترک در نمونه های فلزی و مسطح، آقای کارلسون و همکاران یک نمونه آزمایشگاهی به شکل پانلی از جنس آلومینیوم T6-۶۰۶۱ CORUSTM دارای عیب ساختگی تهیه کردند. شکل ۷ ابعاد شماتیک نمونه موردنظر را نشان می دهد که توسط هاله های برشنگاری با موفقیت شناسایی شده است [۲۸].

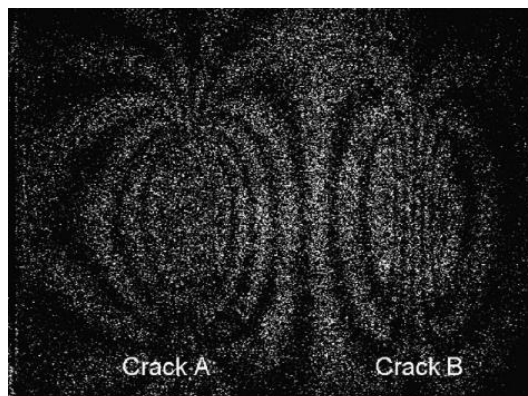
<sup>1</sup> Finite Element Model

نسبت به جهت برش عمودی نسبتاً بیشتر است. ترک را می‌توان از روی الگوهای هاله‌ای برش‌نگاری به صورت کمی نیز ارزیابی نمود. در شکل (b) ۱۱ محل ترک توسط پیکان قابل مشاهده است. در مورد نمونه‌های نازک، انتهای ترک را می‌توان با تغییر در عرض هاله یا تغییر جهت هاله تشخیص داد. در شکل (b) ۱۱، طول ترک  $L_1$  است که حدود ۱۹/۸ میلی‌متر از روی تصویر اندازه‌گیری شده است. در شکل (c) ۱۱ که جهت برشی ۴۵ درجه است، طول ترک به دلیل زاویه برش مورب برابر با جمع  $\Delta_1$  و  $L_2$  می‌باشد. بنابراین طول ترک اندازه‌گیری شده  $(L_2 + \Delta_1)$  تقریباً برابر است با ۱۶ میلی‌متر که به طول واقعی ۱۵ میلی‌متر نزدیک‌تر می‌باشد. این نشان می‌دهد که می‌توان طول ترک را تقریباً با استفاده از هاله‌های برش‌نگاری با جهت‌های مختلف برش نیز به صورت کمی اندازه‌گیری نمود [۲۹].



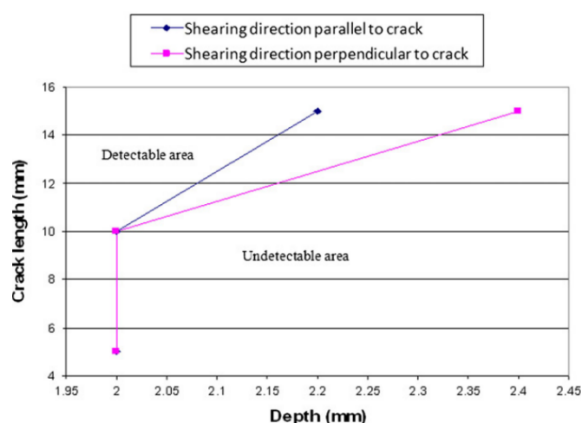
شکل ۱۱- تصاویر برش‌نگاری صفحه آلومینیومی با ترک به طول ۱۵ میلی‌متر و عمق ۱/۸ میلی‌متر با جهت برش (a) عمود بر جهت ترک هنگام افزایش دما جسم (b) عمود بر جهت عیب هنگام کاهش دما جسم (c) تحت زاویه ۴۵ درجه در هنگام افزایش دما (d) به موازات جهت ترک در هنگام افزایش دما [۲۹]

با توجه به این آزمایشات می‌توان نتیجه گرفت برای مواد فلزی مانند آلومینیوم که دارای ترک می‌باشند، هنگامی که جهت برش با جهت طولی ترک عمود نباشد، می‌توان حساسیت بازرسی نسبتاً بالاتری را تجربه نمود، لذا اجازه دهید که یک زاویه  $\alpha$  بین جهت برش و جهت طولی ترک برقرار باشد. الف: هنگامی که  $\alpha = 90^\circ$  است، هاله‌های اضافی ناشی از تنش حرارتی به صورت موازی با هاله‌های دیگر ایجاد می‌شود، همانطور که در شکل (c) ۱۱ مشاهده



شکل ۹- تراکم متفاوت هاله‌ها مربوط به ترک‌های زیرسطحی با عمق متفاوت که ترک سمت راست عمق بیشتری دارد [۲۸]

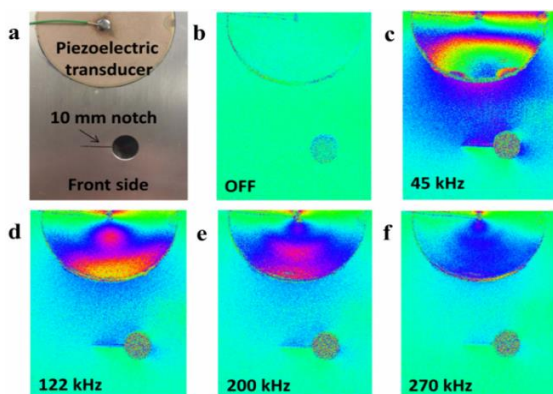
برای ارزیابی حساسیت برش‌نگاری به جهت‌های مختلف برشی در فرایند بازرسی ترک‌های زیر سطحی در نمونه‌های آلومینیومی، ژانوی لیو و همکاران تعدادی ترک با عمق‌های مختلف بر روی یک صفحه آلومینیومی ایجاد نمودند. رابطه بین طول ترک و عمق بحرانی ترک در شکل ۱۰ به صورت نموداری رسم شده است. طبق نمودار، قابلیت تشخیص ترک در برش‌نگاری با توجه جهت برش تصویر نسبت به به جهت طولی ترک متفاوت می‌باشد [۲۹].



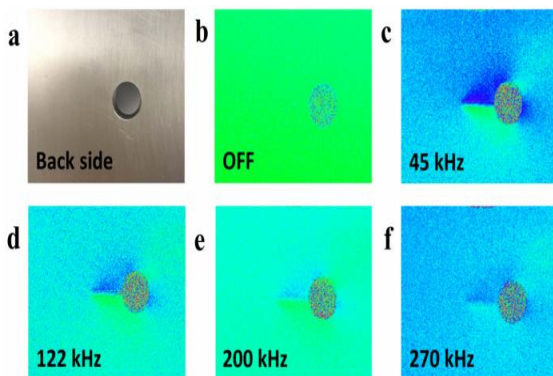
شکل ۱۰- قابلیت تشخیص عیوب توسط برش‌نگاری در صفحه آلومینیومی دارای ترک در عمق مختلف [۲۹]

تصاویر برش‌نگاری برای نمونه آلومینیومی دارای ترکی به طول ۱۵ میلی‌متر در عمق ۱/۸ میلی‌متر، تحت جهت‌های مختلف برشی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. هنگامی که جهت برش تصویر عمود بر جهت ترک نیست، به عنوان مثال زاویه برش ۰ یا ۴۵ درجه نسبت به راستای ترک تنظیم می‌شود، حساسیت برای تشخیص نقص

پس از تعیین فرکانس‌های تشدید مبدل پیزوالکتریکی، ابتدا یک شکاف ۱۰ میلی‌متری که تداعی کننده ترک یا عیب است از روبه‌رو مورد آزمون برش‌نگاری قرار گرفت که نتایج آن مطابق شکل ۱۳ در حالت‌هایی ملاحظه می‌کنید که تصویر a مربوط به عکس نوری عادی از نمونه دارای شکاف می‌باشد، در b تصویر برش‌نگاری از شکاف در حالتی که مبدل پیزوالکتریک خاموش است و تصاویر c تا f نتایج برش‌نگاری برای شکاف موردنظر تحت بارگذاری به وسیله مبدل پیزوالکتریک در فرکانس‌های تشدید مختلف را نشان می‌دهد. شکل ۱۴ نیز نتایج برش‌نگاری در حالت‌ها و شرایط مشابه را در حالی نشان می‌دهد که برش‌نگاری از طرف مقابل و به صورت غیرمخرب انجام شده است که در این حالات شکاف ۱۰ میلی‌متری در عمقی به ضخامت قطعه کار قرار دارد [۳۰].



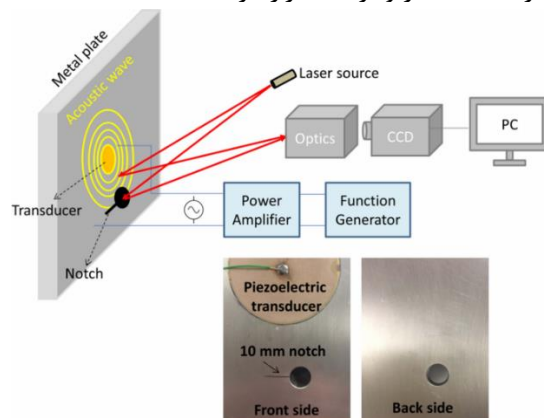
شکل ۱۳- بازرسی ترک ۱۰ میلی‌متری در قطعه آلومینیومی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر از روبه‌رو توسط برش‌نگاری تحت بارگذاری ارتعاشی به وسیله مبدل پیزوالکتریک در فرکانس‌های مختلف [۳۰]



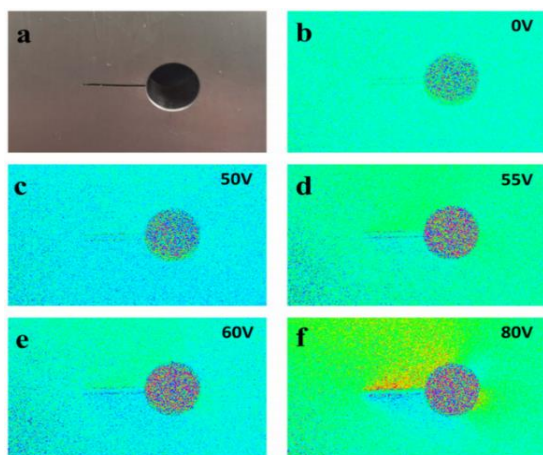
شکل ۱۴- بازرسی ترک ۱۰ میلی‌متری در قطعه آلومینیومی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر از پشت توسط برش‌نگاری تحت بارگذاری ارتعاشی به وسیله مبدل پیزوالکتریک در فرکانس‌های مختلف [۳۰]

می‌شود، این امر موجب دشواری تشخیص و تمایز هاله مربوط به ترک از سایر هاله‌ها می‌گردد. ب: از آنجایی که طول ترک بسیار بزرگ‌تر از عرض آن است، زمانی که زاویه برش بین ۰ تا ۴۵ درجه می‌باشد، نسبت به حالت ۹۰ درجه هاله‌های بیشتری به وسیله ترک تحت تاثیر قرار خواهند گرفت. ج: هنگامی که یک صفحه نازک تحت بارگذاری حرارتی قرار می‌گیرد، ممکن است اجزای شیب‌های جابه‌جایی که برش‌نگاری به آن‌ها حساس است بسیار کوچک باشند، در نتیجه هاله‌ها به اندازه کافی مشاهده نمی‌شوند. با تغییر جهت برش تصویر، به عنوان مثال با انتخاب زاویه برش بین ۰ تا ۴۵ درجه می‌توان یک جزء بزرگ‌تر از شیب‌های جابه‌جایی را در تصاویر برش‌نگاری وارد نمود. بدین صورت حساسیت برای تشخیص عیب بیشتر خواهد شد [۲۹].

نوعی دیگر از ترک‌های مرسوم و خطرناک در مواد، ترک‌های ناشی از خستگی است. بارگذاری ارتعاشی یک روش مناسب برای بازرسی ترک‌ها و مخصوصاً ترک‌های خستگی در قطعات فلزی می‌باشد. هائون لیو و همکاران به این منظور یک نمونه آلومینیومی 2024-T351 با ابعاد ۳۰۰ در ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۱۰ میلی‌متر تهیه نموده و ترک‌های خستگی به اندازه‌های ۳، ۵ و ۱۰ میلی‌متر را با استفاده از فرایند ماشینکاری با تخلیه الکتریکی و اعمال بار خستگی متناوب با ماشین اونیورسال ایجاد کردند. مطابق شکل ۱۲، یک مبدل پیزوالکتریک در فاصله ۲۰ میلی‌متری از یک شکاف از طرفی که قابل رؤیت می‌باشد، جهت تولید امواج فراصوتی سینوسی و متداوم برای تحریک قطعه کار و ترک‌ها قرار گرفته است [۳۰].



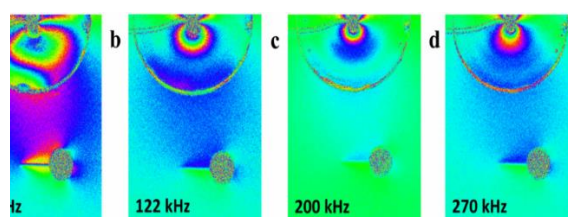
شکل ۱۲- چیدمان برش‌نگاری برای ارزیابی ترک خستگی در نمونه آلومینیومی توسط بارگذاری توسط امواج فراصوتی با استفاده از یک مبدل پیزوالکتریکی [۳۰]



شکل ۱۶- نتایج برش‌نگاری در ولتاژهای مختلف ۰ تا ۸۰ ولت [۳۰]

حال با استفاده از نتایج تحقیقاتی که در مورد شرایط بهینه بارگذاری انجام شد می‌توان ترک‌های خستگی را در نمونه آلومینیومی بازرسی نمود. نمونه‌های مورد آزمایش، صفحات آلومینیومی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و دارای ترک‌های خستگی به طول ۳، ۵ و ۱۰ میلی‌متر بودند. فرکانس‌های موثر از ۱۰ تا ۳۵۰ کیلوهرتز با فاصله ۱ کیلوهرتز تنظیم شده‌اند. شکل ۱۷ تصویر عادی و نتایج برش‌نگاری را برای نمونه‌های دارای ترک خستگی با طول ۳، ۵ و ۱۰ میلی‌متر از دو طرف روبه‌رو و پشت نمونه نشان می‌دهد. برش‌نگاری صوتی در فرکانس موثر ۴۵ کیلوهرتز و ولتاژ موثر ۱۰۰ انجام شد. شکل ۱۷(a) تا ۱۷(c) تصاویر عادی یا نوری از روبه‌رو نمونه‌ها را نشان می‌دهد که ترک‌های خستگی از این طرف قابل رویت هستند، اما از سطح پشتی نمونه، مشاهده نمی‌شوند (شکل ۱۷(g) و ۱۷(i)). برای نمونه با ترک خستگی ۱۰ میلی‌متری که از روبه‌رو آزمایش شده است، تشخیص ترک به صورت موفقیت‌آمیز انجام شده است (شکل ۱۷(d))، اگرچه طول تشخیص داده شده کمی کوتاه‌تر می‌باشد (حدود ۷ میلی‌متر). برای نمونه‌هایی که دارای ترک‌های خستگی ۵ و ۳ میلی‌متر و از روبه‌رو مورد آزمایش قرار گرفته‌اند نیز نتایج برش‌نگاری در شکل‌های ۱۷(e) تا ۱۷(f) به ترتیب حاکی از موفقیت‌آمیز بودن تشخیص ترک‌ها منتها با طول‌های تشخیصی به ترتیب ۳ و ۲ میلی‌متر می‌باشد. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که برش‌نگاری مبتنی بر امواج صوتی می‌تواند اندازه ترک را از

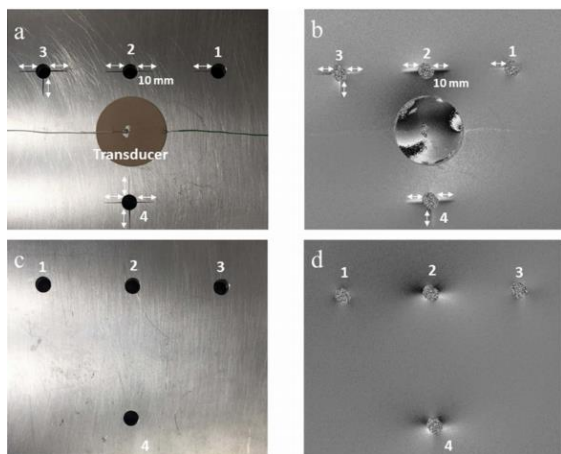
جهت بررسی تاثیر ابعاد نمونه بر روی نتایج، آزمون برش‌نگاری بر روی نمونه‌ای دیگر از همان جنس و با ضخامت ۶ میلی‌متر انجام شد. همانطور که در شکل ۱۵ نیز دیده می‌شود، از همان فرکانس‌های قبلی جهت تحریک نمونه استفاده گردیده که بر اساس نتایج، ابعاد نمونه تاثیری بر روی فرکانس‌های بهینه ندارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فرکانس بهینه آزمون تنها به وسیله فرکانس‌های تشدید مبدل‌های پیزوالکتریک تعیین خواهد شد و وابستگی به ابعاد نمونه و اندازه عیوب ندارد [۳۰].



شکل ۱۵- انجام آزمون‌های مشابه با فرکانس‌های مشابه بر روی نمونه آلومینیومی دارای ضخامت ۶ میلی‌متر جهت بررسی وابستگی فرکانس‌های آزمون برش‌نگاری به ابعاد نمونه [۳۰]

در برش‌نگاری برای ایجاد کنتراست کافی جهت مشاهده نقص در سازه‌های مورد بررسی، به یک سطح مشخصی از جابه‌جایی سطحی نیاز است. جهت بررسی آستانه تشخیص در این روش به وسیله امواج صوتی به عنوان بارگذاری تنش، طبق شکل ۱۶ آزمون برش‌نگاری در ولتاژهای موثر مختلف انجام شد. نمونه آزمایشی یک صفحه از جنس آلایژ آلومینیوم با ضخامت ۱۰ میلی‌متر با یک شکاف ۱۰ میلی‌متری در نزدیکی سوراخ‌های اتصال دهنده می‌باشد (شکل ۱۶(a)). فرکانس موثر بر روی فرکانس بهینه که ۴۵ کیلوهرتز می‌باشد ثابت در نظر گرفته شد. زمانی که ولتاژ موثر بر روی مقادیر  $V_{pp} = 50$  و  $V_{pp} = 0$  تنظیم شده است هیچ عیبی شناسایی نشد (شکل ۱۶(b) و ۱۶(c)). در ولتاژ موثر  $V_{pp} = 55$  عیب موجود در نمونه، قابل تشخیص می‌باشد (شکل ۱۶(d))، لذا با افزایش ولتاژ از ۵۵ تا ۸۰، تصاویر برش‌نگاری کنتراست بهتری را نشان می‌دهند (شکل ۱۶(e) و ۱۶(f)). بنابراین کمترین مقدار ولتاژ موثر جهت تشخیص ترک ۱۰ میلی‌متری در فرکانس تشدید ۴۵ کیلوهرتز،  $V_{pp} = 55$  تعیین شد [۳۰].

همچنین قابلیت ارزیابی همزمان چند ترک به وسیله چیدمان موردنظر بررسی شد که برای این منظور مطابق شکل ۱۸ مبدل پیزوالکتریک را در فاصله‌ای بین ترک‌ها قرار دادند، نتایج حاکی از قابلیت تشخیص همزمان عیوب در نمونه آلومینیومی بود، منتها نتایج وابسته به موقعیت قرارگیری مبدل پیزوالکتریک نسبت به ترک‌ها بودند.



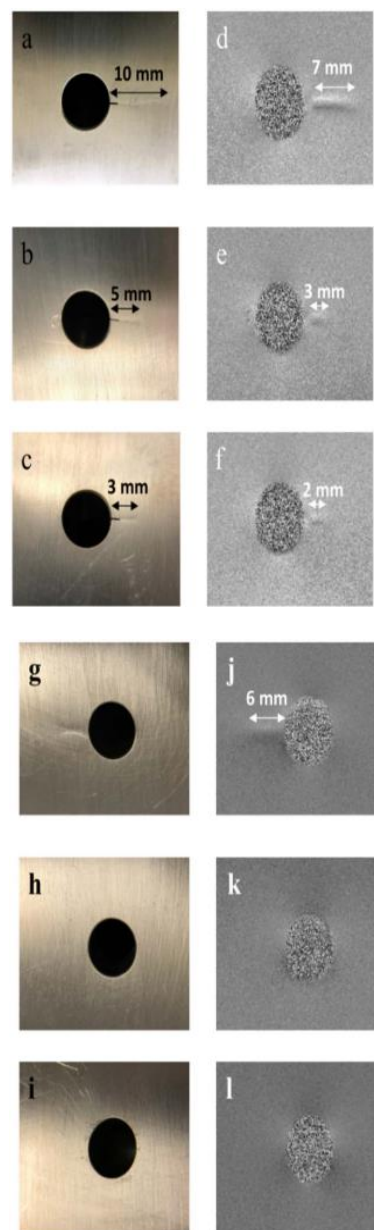
شکل ۱۸- شناسایی ترک‌های خستگی پیرامون چند سوراخ جهت بررسی قابلیت ارزیابی همزمان چند عیب توسط چیدمان برش‌نگاری صوتی [۳۰]

### ۲-۳- بازرسی ترک در نمونه‌های کامپوزیتی مسطح

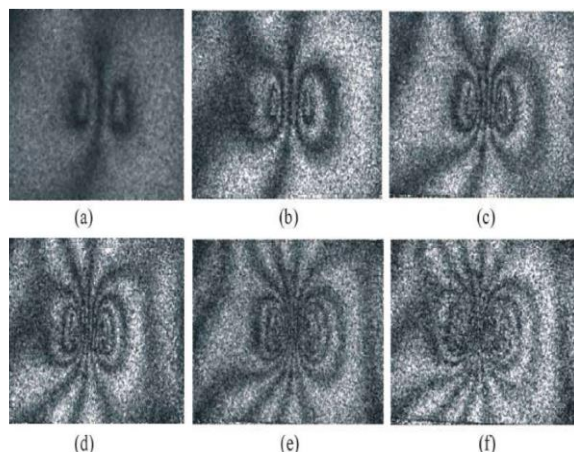
مواد مرکب تقویت شده با الیاف پایه پلیمری به دلیل ساختار منحصربه‌فرد و ناهمگن آن‌ها مستعد به‌وجود آمدن عیوب هم در زمان ساخت قطعات و هم در هنگام عملکرد قطعه کار می‌باشند. بازرسی این مواد توسط روش‌های سنتی بسیار دشوار و بعضاً غیرممکن است. برش‌نگاری یک روش مفید و کارا در ارزیابی این مواد می‌باشد. در پژوهش‌هایی که بر روی این مواد متمرکز بوده است، اکثراً عیوب صفحه‌ای، چسبندگی و سوراخ‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و بررسی ترک‌ها به دلیل دشوار بودن آن‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

اکبری و سلطانی از جمله کسانی هستند که برای نخستین بار ترک‌ها را در مواد مرکب بررسی نموده‌اند. آن‌ها برای بررسی کاربرد برش‌نگاری جهت بازرسی ترک‌های زیرسطحی در مواد مرکب تقویت شده با الیاف شیشه و همچنین بررسی اثرات پارامترهای مختلف از جمله بارگذاری و جهت و اندازه برش، تعدادی ترک در اندازه و

سمت جلو با اختلاف ۳ میلی‌متر تشخیص دهد. در آزمایش‌هایی که از پشت نمونه انجام شد، ترک‌ها نقیصی زیر سطحی در عمق ۱۰ میلی‌متر محسوب می‌شوند. در بازرسی نمونه دارای ترک ۱۰ میلی‌متری، ترک موردنظر به وضوح با طول تقریبی ۶ میلی‌متر قابل مشاهده است که این موفقیت به لطف قدرت نفوذ قوی امواج فراصوتی می‌باشد (شکل ۱۷(j)). برای ترک‌های خستگی ۵ و ۳ میلی‌متری که به صورت زیرسطحی از پشت نمونه آزمایش شده‌اند، همانطور که در شکل‌های ۱۷(k) تا ۱۷(l) نشان داده شده است، نتایج برش‌نگاری موفقیت آمیز نبوده است [۳۰].

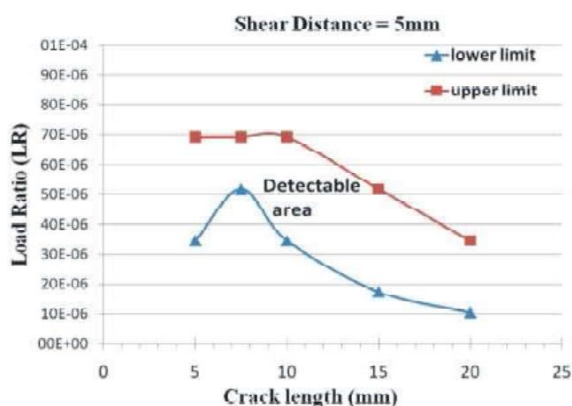


شکل ۱۷- نتایج برش‌نگاری برای بازرسی نمونه‌های آلومینیومی دارای ترک‌های خستگی به صورت سطحی و زیرسطحی [۳۰]



شکل ۲۰- نتایج برش‌نگاری برای ترک به طول ۱۰ میلی‌متر تحت بارگذاری‌های متفاوت از a تا f به ترتیب ۱۴۷، ۲۹۴، ۴۴۱، ۵۸۸، ۷۳۵ و ۹۸۰ نیوتن [۳۱]

طی آزمایشات متعددی که بر روی نمونه‌های موجود در شکل ۱۹ انجام گرفت، برای نشان دادن تاثیر پارامترهای مختلف بر نسبت بارگذاری، در نمودارهای جداگانه‌ای اثرات این پارامترها مشخص گردیده است. در شکل‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ به ترتیب تاثیر اندازه‌های مختلف برش ۵، ۸ و ۱۰ میلی‌متر را بر روی نسبت بارگذاری مشاهده می‌نمائید که در هر نمودار یک منطقه تحت عنوان ناحیه قابل تشخیص عیوب مشخص گردیده است. در شکل ۲۴ نیز تاثیر موقعیت قرارگیری عیوب بر روی نسبت بارگذاری نشان داده شده است که نتایج حاکی از آن است که هرچه موقعیت ترک نسبت به جهت برش عمودتر باشد، تشخیص‌پذیری ترک بهتر می‌باشد.



شکل ۲۱- میزان نسبت بارگذاری قابل قبول برای تشخیص ترک‌های عرضی با طول مختلف در اندازه برش ۵ میلی‌متر [۳۱]

زاویه‌های مختلف بر روی نمونه‌هایی با ابعاد ۷۰ در ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده از ۸ لایه از الیاف شیشه ایجاد نمودند. یکی از مهم‌ترین پارامترها در برش‌نگاری ترک‌ها، بارگذاری مناسب می‌باشد. از آنجا که یکی از محدودیت‌های برش‌نگاری، وابستگی میزان بارگذاری و در نتیجه نتایج برش‌نگاری به هندسه نمونه می‌باشد، در این تحقیق یک پارامتر بی‌بعد به نام نسبت بارگذاری مطابق رابطه ۱۶، جهت تعیین محدوده‌ای از بارگذاری الاستیک برای هر ترک در طول‌ها و زاویه‌های مختلف تحت مقادیر مختلف برش به دست آمده است که در ادامه نتایج به شکل نمودارهایی ارائه شده است [۳۱].

$$LR = \frac{\sigma_{av}}{E_C} \quad (16)$$

$$E_C = E_F V_F + E_M V_M \quad (17)$$



شکل ۱۹- نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه دارای ترک‌های عرضی با طول متفاوت و ترک‌های مایل و زاویه‌دار [۳۱]

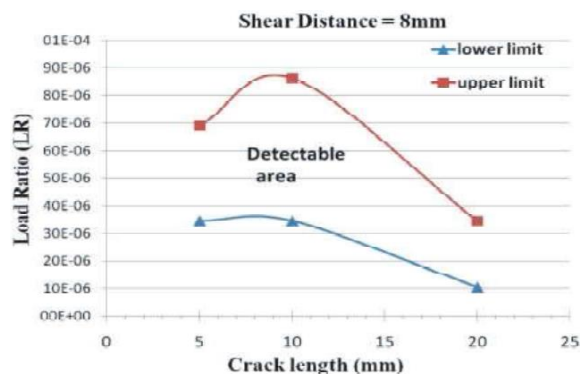
همانطور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌کنید نتایج برش‌نگاری برای ترک ۱۰ میلی‌متری در نمونه شماره یک با بارگذاری‌های کششی متفاوت از ۱۴۷ تا ۹۸۰ نیوتن به دست آمده است. به منظور بی‌اثر کردن شرایط محیطی بر روی نتایج بازرسی، همه آزمایش‌ها با پارامترهای یکسان انجام پذیرفته‌اند. همانگونه که از روی نتایج مشاهده می‌شود، کمترین مقدار بارگذاری که در آن ترک آشکار می‌شود ۱۵۰ نیوتن است. همچنین اگر بارگذاری کششی از ۷۰۰ نیوتن فراتر رود، هاله‌ها دیگر قابل مشاهده نخواهند بود. علاوه بر این چنانچه بارگذاری به صورت کنترل شده اعمال نشود، اثرات ناهمبستگی حاصل از آن، هاله‌ها را غیرقابل مشاهده می‌سازد [۳۱].

یکی از چالش‌های برش‌نگاری، بررسی کاربردهای برش-نگاری در اندازه‌گیری کمی عیوب و مخصوصاً ترک‌ها موجود در مواد مرکب است. از آنجا که برش‌نگاری کرنش-های سطحی را اندازه‌گیری می‌کند و این کرنش‌ها به شکل هاله‌های سیاه و سفید ظاهر می‌شوند، می‌توان با تفسیر هاله‌ها به اطلاعات کمی از عیب موردنظر دست یافت. اصلی‌ترین عواملی که در برش‌نگاری بر روی تشکیل این هاله‌ها تاثیر می‌گذارند، اندازه بارگذاری، اندازه عیب و عمق آن می‌باشد. از ویژگی‌های هر هاله می‌توان به تعداد و تراکم آن‌ها در هر تصویر اشاره نمود، لذا با یافتن ارتباط بین عوامل موثر در شکل هاله‌ها نظیر بارگذاری، فاصله برش، طول و عمق ترک و تعداد و تراکم هاله‌ها می‌توان روشی برای تخمین طول و عمق ترک‌ها پیدا کرد. محمدی و اکبری به این منظور مجموعه‌ای از آزمایشات تجربی در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت جهت یافتن ارتباط بین پارامترهای مذکور طراحی کردند که خروجی این آزمایشات تعداد و تراکم هاله‌ها بود. در ادامه با برآزش داده‌های به دست آمده از نتایج تجربی، دو معادله مطابق رابطه‌های ذیل جهت اندازه‌گیری عمق و طول ترک‌ها استخراج نمودند. در این معادلات، تعداد (n) و تراکم هاله-های ایجاد شده در برش‌نگاری (a)، بر حسب طول ترک (l)، عمق ترک (d) و نیروی آزمون (F) بیان شده است [۳۲].

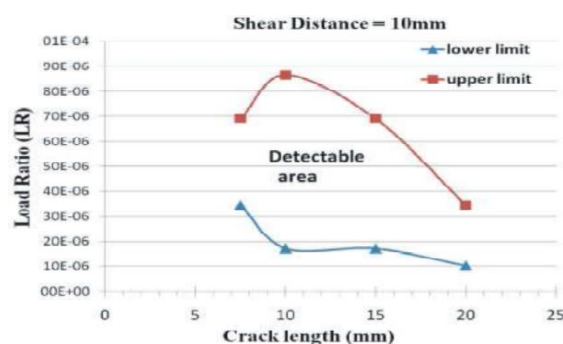
$$n = -1.75303 + 0.11181l + 2.90438 \times 10^{-3} \times F - 0.27196 \times l \times d + 1.41421 \times 10^{-3} \times l \times F - 2.33112 \times 10^{-3} \times d \times F \quad (18)$$

$$\log(a) = 0.928 - 0.0648 \times l + 0.381 \times d - 9.081 \times 10^{-4} \times F \quad (19)$$

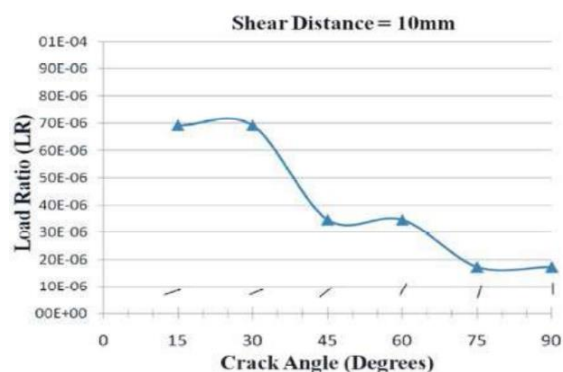
برای صحت‌سنجی و تائید نتایج از شبیه‌سازی عناصر محدود توسط نرم‌افزارهای تحلیل عددی آباکوس و به کمک نرم‌افزار متلب استفاده شد که در این روش پس از اندازه‌گیری توزیع فاز، الگوی هاله‌ای شبیه‌سازی شده به دست آمد. در شکل ۲۵ مقایسه هاله‌های به دست آمده از آزمایشات تجربی و هاله‌های شبیه‌سازی شده را مشاهده می‌نمائید که دارای تطابق خوبی با یکدیگر هستند. نتایج مقایسه هاله‌های به دست آمده از هر دو روش عددی و



شکل ۲۲- میزان نسبت بارگذاری قابل قبول برای تشخیص ترک‌های عرضی با طول مختلف در اندازه برش ۸ میلی‌متر [۳۱]



شکل ۲۳- میزان نسبت بارگذاری قابل قبول برای تشخیص ترک‌های عرضی با طول مختلف در اندازه برش ۱۰ میلی‌متر [۳۱]



شکل ۲۴- نسبت بارگذاری قابل قبول برای تشخیص ترک‌های زاویه‌دار [۳۱]

با تفسیر نمودارهای مذکور، می‌توان به این نتیجه رسید که اندازه برش ۱۰ میلی‌متر و جهت برش عمود بر ترک یا به عبارت دیگر موقعیت قرارگیری عمود عیوب نسبت به جهت برش، تشخیص‌پذیری عیوب را بهبود می‌بخشد. لذا می‌توان از این مقادیر به عنوان مقدارهای بهینه نام برد [۳۱].

<sup>1</sup> Design expert

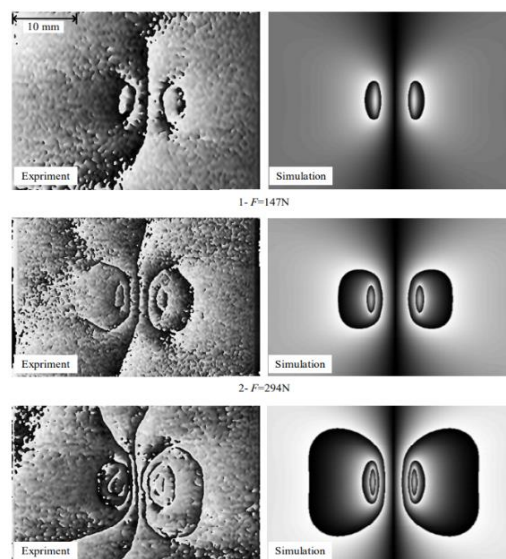
با معلوم بودن تعداد و تراکم هاله‌ها و پیدا کردن نقطه تلاقی آن‌ها، طول و عمق ترک متناظر با آن نقطه بدست می‌آید. نمودار شکل ۲۶ به ازای سایر مقادیر نیروی آزمون نیز قابل رسم و استفاده است. از این رو می‌توان پس از انجام هر آزمون تجربی، مقادیر  $a$  و  $n$  را از نتایج تجربی به دست آورده و با کمک منحنی راهنما، اندازه و عمق عیب را تخمین زد [۳۲].

### ۳-۳- بازرسی ترک در نمونه‌های فلزی و پلیمری سطوح منحنی

بازرسی ترک در سطوح منحنی از جمله لوله و مخازن تحت فشار در مجموعه‌های صنعتی بسیار حیاتی می‌باشد چرا که به دلیل شرایط عملیاتی سخت و طاقت‌فرسا نظیر تنش‌های گرمایی، بارهای مکانیکی، خوردگی، مخازن تحت فشار در برابر رشد ترک خستگی آسیب پذیر بوده و می‌تواند منجر به شکست کامل شده و عواقب فاجعه‌باری در پی داشته باشد. استفاده از مخازن تحت فشار و لوله‌های بی‌شمار هم در صنایع نیروگاهی و هم در صنایع پتروشیمی رایج است و سالانه تعداد این تاسیسات رشد می‌نماید. بنابراین نگهداری روزمره برای جلوگیری از ضرر و زیان اقتصادی و همچنین اطمینان از ایمنی عمومی ضروری است. برای تشخیص ترک خوردگی زودرس در مخازن تحت فشار می‌توان از روش برش‌نگاری که امکان اندازه‌گیری سریع و تمام ناحیه‌ای شیب جابه‌جایی و اجزای کرنش انتخاب شده را فراهم می‌نماید، استفاده نمود. با استفاده از برش‌نگاری، نقص‌های زیر سطحی در یک خط لوله نیز می‌تواند تقریباً بلافاصله آشکار شود. از طرف دیگر، آزمون فراصوتی نیاز به اسکن نقطه به نقطه در امتداد سطح و تماس قابل توجه بین مبدل و جسم دارد.

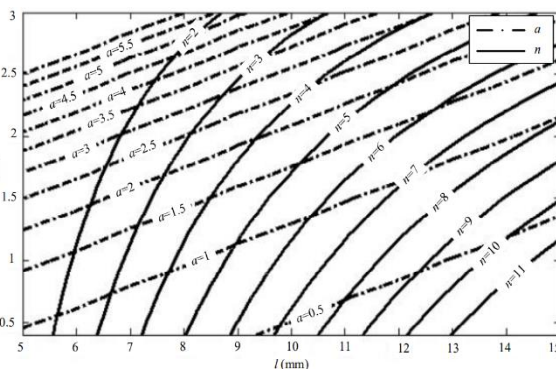
برای به چالش کشیدن قابلیت روش برش‌نگاری در بازرسی و ارزیابی سطوح منحنی، کارلسون و همکاران نمونه‌های آزمایشگاهی از جنس لوله فولادی ضدزنگ ۳۱۶ و لوله‌های پلاستیکی پی‌وی‌سی با ترک‌های زیر سطحی را تهیه نمودند. با استفاده از فرایند ماشینکاری با تخلیه الکتریکی، دو ترک عمودی و محیطی به دور لوله‌ای از جنس فولاد ضدزنگ ۳۱۶، مهندسی شده است. ضخامت دیواره لوله ۶ میلی‌متر است. همانطور که در شکل ۲۷

تجربی بر اساس تعداد و تراکم هاله‌ها، حاکی از اختلاف ۲۱/۴٪ است [۳۲].



شکل ۲۵- مقایسه نتایج الگوی فازی به دست آمده از شبیه‌سازی و نتایج تجربی برای نمونه‌ای با ترک به عمق ۰/۵ میلی‌متر و طول ۱۰ میلی‌متر تحت بارگذاری‌های مختلف [۳۲]

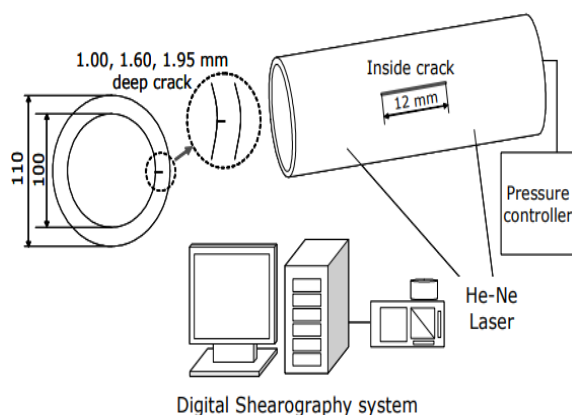
اثرات پارامترهای مختلف از جمله نیروی آزمون، اندازه برش، طول و عمق ترک بر روی تعداد و تراکم هاله‌ها در قالب نمودارهایی به دست آمده است که در اینجا از نمایش آن‌ها صرف نظر شده است. همچنین به دلیل دشواری استفاده از معادلات جبری ریاضی یک روش ترسیمی جهت تخمین آسان و سریع اندازه و عمق ترک‌ها برای هر نیروی آزمون ارائه شد. در شکل ۲۶ معادلات ۱۸ و ۱۹ به ازای نیروی آزمون ۶۵۰ نیوتن به شکل کانتور دوبعدی رسم شده‌اند.



شکل ۲۶- نمودار کانتور دو بعدی تعداد (n) و تراکم هاله‌ها (a) بر اساس طول (L) و عمق ترک (d) به ازای نیروی آزمون ۶۵۰ نیوتن [۳۲]

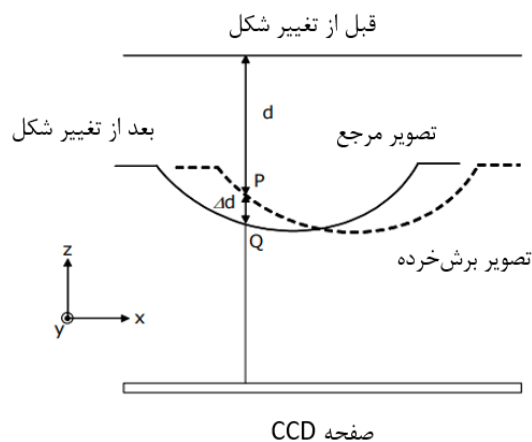


اطمینان‌پذیری یک ساختار را می‌توان بر اساس مشخصات عیب نظیر موقعیت، اندازه و شکل آن بررسی نمود، لذا می‌توان قابلیت برش‌نگاری به‌منظور تخمین کمی ابعاد و هندسه یک عیب در راستای ایمنی و تعیین عمر مفید یک ساختار به چالش کشید. با توجه به اهمیت اندازه برش در برش‌نگاری، کیسو برای تعیین تاثیر مقدار آن در اندازه‌گیری عیب و یافتن محل عیب، یک ترک داخلی به طول ۱۲ میلی‌متر را در لوله‌ای فولادی مطابق شکل ۳۰ مورد بررسی قرار داد. همچنین نتایج آن نیز توسط آزمون فراصوتی اشعه ایکس مورد اعتبارسنجی قرار گرفت [۳۳].



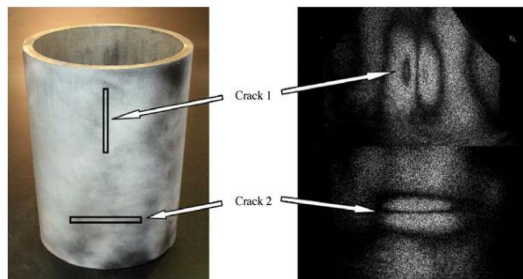
شکل ۳۰- سیستم بازرسی لوله فولادی و موقعیت قرارگیری ترک موردنظر بر روی آن [۳۳]

شکل ۳۱ انطباق دو تصویر کاملاً مشابه سطح منحنی را بر روی دوربین برش‌نگاری با اندکی جابه‌جایی نسبت به هم که مساوی است با اندازه فاصله برش، نشان می‌دهد.



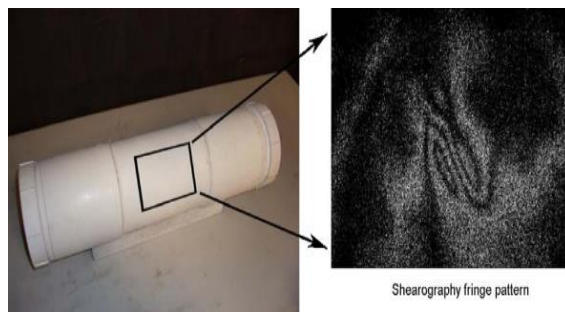
شکل ۳۱- تداخل دو تصویر برشی از سطح منحنی و نقاط P و Q بر روی صفحه دوربین [۳۳]

نشان داده شده است، ترک‌ها دارای ۴ میلی‌متر طول و در ۲ میلی‌متر زیر سطح خارجی لوله قرار دارند. الگوهای هاله‌ای برش‌نگاری پس از تحریک لوله توسط بارگذاری حرارتی، به وضوح ترک‌های پنهان شده را نشان می‌دهد [۲۸].

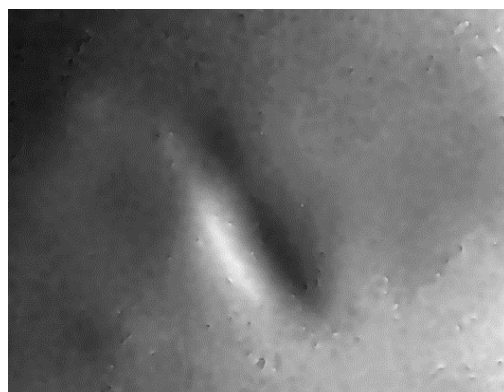


شکل ۲۷- لوله از جنس فولاد ضدزنگ ۳۱۶ بازرسی شده توسط برش‌نگاری با تحریک حرارتی [۲۸]

برای بیشتر نشان دادن مزیت و خواص مواد و یا تاثیر مواد در آزمون برش‌نگاری، یک لوله ساخته شده از پی‌وی‌سی با ترک داخلی در عمق خاص و با زاویه مایل نیز به ترتیبی که در شکل ۲۸ مشاهده می‌شود، آزمایش شد. نقشه فاز واپیچیده ترک نیز در شکل ۲۹ قابل رویت است.

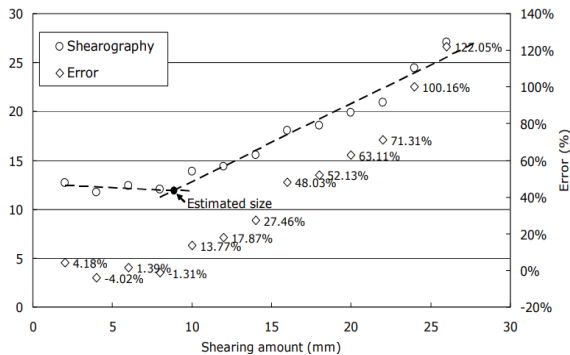


شکل ۲۸- بازرسی ترک داخلی در لوله فاضلاب از جنس پی‌وی‌سی توسط روش برش‌نگاری [۲۸]



شکل ۲۹- فاز واپیچیده ترک داخلی در لوله فاضلاب از جنس پی‌وی‌سی [۲۸]

واقعی قرار دارند، مخصوصاً در اندازه برش ۸ میلی‌متر، اندازه‌گیری ترک با کمترین مقدارخطا در حدود ۱/۳۱- درصد محاسبه شد.

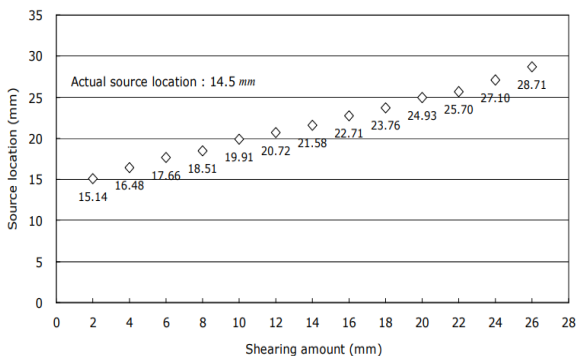


شکل ۳۳- اندازه عیب ترک با توجه به تغییر اندازه برش [۳۳]

همچنین یک روش جدید به منظور تخمین اندازه ترک از روی الگوها در شکل قبلی ارائه شده است. به این صورت که نقطه تقاطع دو درون‌یابی خطی در نمودار بالا به عنوان اندازه عیب تعریف می‌شود که مقدار آن در تطابق خوبی با مقدار واقعی می‌باشد.

شکل ۳۴ نشان می‌دهد که اندازه برش بر روی تعیین کمی محل عیب تاثیرگذار می‌باشد. بیشترین تغییرشکل سطح نمونه همان محل عیب است که نمودار تغییرشکل حاصل از برش‌نگاری ارائه شده در شکل ۳۲، در محل عیب باید صفر باشد. مقادیر محاسبه شده توسط برش-نگاری مربوط به محل قرارگیری عیب در لوله فولادی در شکل ۳۴ ثبت شده است که این اندازه‌گیری با مقداری خطا ناشی از برش دستگاه تداخل‌گر مواجه است که با معادله زیر اصلاح شده است:

$$SL = X_{\Delta d=0} = \frac{\Delta x}{2} \quad (21)$$

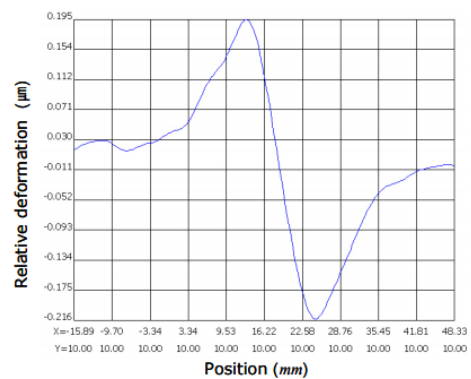


شکل ۳۴- محل عیب ترک با توجه به تغییر اندازه برش [۳۳]

اختلاف فاز مربوطه  $\Delta\varphi$  به وسیله تداخل حاصل از انطباق دو نقطه  $P$  و  $Q$  با مقداری جابه‌جایی در جهت  $X$  توسط تفاضل تصاویر قبل و بعد از بارگذاری قابل بیان است. با این تفاوت که در ارزیابی سطوح منحنی یک پارامتر متفاوت  $\Delta d$  نسبت به معادله ۱۵ داریم که اصلی‌ترین عامل تفاوت سطوح منحنی و سطوح تخت در برش‌نگاری قلم داد می‌شود. طبق معادله ذیل داریم:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda\delta x}\Delta d = \frac{4\pi}{\lambda}\frac{\partial d}{\partial x}\Delta x \quad (20)$$

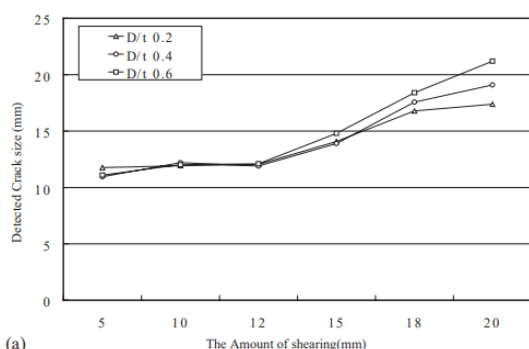
با توجه به کاهش استحکام خمشی موضعی یا محلی به دلیل ترک‌های موجود، داده‌های فاز بازایی شده می‌تواند یک شاخص مفید برای دقت ترک‌های شناسایی شده تحت بارگذاری فشاری یکسان باشد. در شکل ۳۰ لوله موردنظر تحت فشار داخلی قرار گرفته و دیواره لوله در ناحیه‌ای که دارای ترک است توسط نیروی فشار داخلی بیشتر از نواحی سالم دچار تغییرشکل می‌شود. نمودار تغییرشکل نمونه جهت محاسبه اندازه طول ترک در شکل ۳۲ مشخص شده است که اندازه طول ترک برابر است با فاصله بین بیشینه و کمینه نمودار ذکر شده. جهت استخراج نقشه فاز و فاز واپیچیده و در نتیجه نمودار تغییرشکل از تکنیک چهار مرحله‌ای انتقال فاز ذکر شده در مقاله آقای گلود استفاده شده است [۳۳].



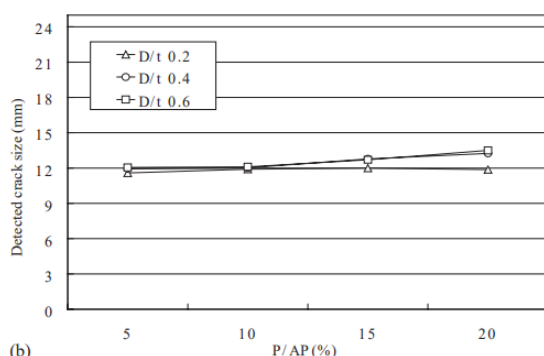
شکل ۳۲- نمودار تغییرشکل لوله بعد از بارگذاری به وسیله فشار داخلی جهت اندازه‌گیری ترک [۳۳]

برای تحلیل و مشاهده اثر مقدار برش بر تخمین اندازه ترک، شکل ۳۳ اندازه واقعی ترک در مقایسه با اندازه تشخیصی توسط برش‌نگاری را با توجه به تغییر اندازه برش در جهت  $X$  نشان می‌دهد. نتایج تجربی برش‌نگاری با حداکثر ۴/۱۸ درصد خطا در تطابق خوبی با مقدار

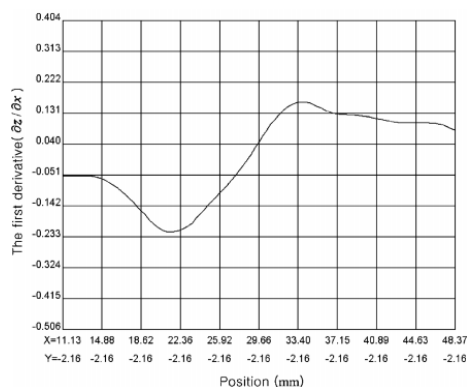
اندازه ترک را بدون معلوم بودن جزئیات آن و مستقل از سایر پارامترهای برش‌نگاری محاسبه نمود [۳۵].



(a) شکل ۳۵- ارزیابی کمی اندازه طول ترک با توجه به تغییرات اندازه برش [۳۵]



(b) شکل ۳۶- ارزیابی کمی اندازه طول ترک با توجه به تغییرات اندازه بارگذاری [۳۵]



شکل ۳۷- مشتق اول جابه‌جایی حاصل از مشتق‌گیری از جابه‌جایی حاصل از بکارگیری روش ESPI [۳۵]

با مقایسه دو روش معمول در بارگذاری سطوح منحنی، می‌توان نتیجه گرفت که بارگذاری تحت فشار به دلیل اینکه به محفظه‌ای بسته از لوله جهت بازرسی آن نیاز دارد، اندکی دشوار و پیچیده‌تر است. در صورتی که بارگذاری حرارتی می‌تواند روشی مناسب‌تری برای تشخیص ترک داخلی در لوله‌های باز و سازه‌های بزرگ

یکی از محدودیت‌های برش‌نگاری در محاسبه دقیق اندازه ترک‌ها این است که نتایج برش‌نگاری بسیار وابسته به پارامترهای اندازه برش، جهت برش و اندازه بارگذاری می‌باشد. این در حالی است که انتخاب این پارامترها بستگی به اندازه و شکل عیب یا ترک دارد. بنابراین تخمین دقیق اندازه ترک بدون معلوم بودن جزئیات ترک، کار دشواری است. از طرفی دیگر روش ESPI یا تداخل‌سنجی الکترونیکی الگوهای لکه‌ای به صورت مستقل از پارامترهای برش‌نگاری عمل می‌کند و تنها وابسته به مقدار بارگذاری می‌باشد. از این رو باتوجه به اینکه برش‌نگاری مشتق جابه‌جایی و ESPI مقدار خالص جابه‌جایی را اندازه‌گیری می‌کند، با مشتق گرفتن از نتایج ESPI می‌توان نتایج این دو روش را با هم مقایسه کرد [۳۴]. آقای کیم و همکاران برای توسعه کاربرد روش برش‌نگاری در راستای ارزیابی کمی عیوب بدون اطلاع از جزئیات عیب موردنظر، به کمک ترکیبی از دو روش ESPI و برش‌نگاری، راهکار جدیدی را ارائه کردند. آن‌ها یک ترک به طول ۱۲ میلی-متر در عمق‌های ۱، ۲ و ۳ میلی-متر در لوله‌ای از جنس فولاد زنگ‌نزن ایجاد نموده و از روش برش‌نگاری برای یافتن مقادیر بهینه اندازه برش و بارگذاری استفاده کردند. نتایج حاصله را در نمودار موجود در شکل‌های ۳۵ و ۳۶ می‌توان مشاهده نمود [۳۵].

در شکل‌های ۳۵ و ۳۶ تاثیر پارامترهای اندازه برش و بارگذاری بر طول تخمینی ترک شناسایی شده توسط روش برش‌نگاری نشان داده شده است. بهترین نتایج اندازه‌گیری ترک با برش‌نگاری در مقدار برش ۱۲ میلی-متر و بارگذاری به اندازه ۱۰ درصد میزان بار مجاز لوله مورد آزمایش، حاصل شد. برای ارزیابی کمی ترک، تکنیک جابه‌جایی فاز و فاز واپیچیده با بکارگیری یک پیزوالکتریک جهت تولید الگوهای تداخلی لکه‌ای چهار مرحله‌ای استفاده شد و اندازه ترک نیز از روی اندازه‌گیری فاصله پیک تا پیک نمودار برش‌نگاری محاسبه گردید.

برای به دست آوردن نمودار تغییرشکل نمونه و محاسبه اندازه ترک با استفاده از روش ESPI، بعد از یافتن مقدار بهینه بارگذاری در شکل ۳۶، این مقدار برای بازرسی لوله توسط روش ESPI نیز استفاده شد و پس از مشتق‌گیری از نتایج حاصل از این روش، نمودار مشتق جابه‌جایی همانند شکل ۳۷ به دست آمد که از روی آن می‌توان

آزمایش سطوح تخت از جنس مواد فلزی و مواد مرکب، توانایی برش‌نگاری در ارزیابی ترک‌های داخلی و اندازه‌گیری آن‌ها در لوله‌های فلزی و غیرفلزی با استناد به پژوهش‌های پیشین نشان داده شد. برای پژوهش‌های بیشتر در این راستا، می‌توان بررسی قابلیت‌های برش‌نگاری در ارزیابی کیفی و کمی ترک‌های زیرسطحی در اندازه‌های کوچک‌تر و عمق‌های بیشتر با دقت بالاتر را در مواد گوناگون که تاکنون بر روی آن‌ها کار نشده است، پیشنهاد نمود.

#### ۵- منابع

- [1] N. Xu, X. Xie, X. Chen, L. Yang, (2014). Shearography for specular object inspection, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 61, No. 1, pp. 14-18.
- [2] Hung, Y. Y., Chen, Y. S., Ng, S. P., Liu, L., Huang, Y. H., Luk, B. L., ... & Chung, P. S. (2009). Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 64(5-6), 73-112.
- [3] Francis, D., Tatam, R. P., & Groves, R. M. (2010). Shearography technology and applications: a review. *Measurement science and technology*, 21(10), 102001.
- [4] Fantin, A. V., Dal Pont, A., Willemann, D. P., & Albertazzi, A. (2006, June). Comparison between temporal and spatial phase unwrapping for damage detection using shearography. In *Seventh International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications* (Vol. 6345, p. 634510). International Society for Optics and Photonics.
- [5] Bai, P., Zhu, F., & He, X. (2015). Out-of-plane displacement field measurement by shearography. *Optics & Laser Technology*, 73, 29-38.
- [6] Leendertz, J. A., & Butters, J. N. (1973). An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 6(11), 1107.
- [7] S. L. Toh, F. S. Chau, V. P. Shim, C. J. Tay, H. M. Shang, (1990). Application of shearography in nondestructive testing of composite plates, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 23, No. 3, pp. 267-275.
- [8] Nakadate, S., T. Yatagai, and H. Saito, (1980). Digital speckle-pattern shearing interferometry. *Applied Optics*, 19(24): p. 4241-4246.
- [9] R. Kastle, E. Hack, U. Sennhauser, (1999). Multiwavelength shearography for quantitative measurements of two-dimensional strain distributions, *Applied Optics*, Vol. 38, No. 1, pp. 96-100.
- [10] Hung, Y. Y. (1982). Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing. *Optical engineering*, 21(3), 213391.
- [11] Hung, Y. Y. (1996). Shearography for non-destructive evaluation of composite structures. *Optics and lasers in engineering*, 24(2-3), 161-182.
- [12] Yang, L., et al., (1998). Vibration analysis by means of digital shearography. *Optics and lasers in engineering*, 30(2): p. 199-212.

تحت فشار محصور نشده باشد، چراکه به چیدمان خاصی نیاز ندارد. علاوه بر این، بارگذاری حرارتی بدون نیاز به تماس با سطح قطعه کار انجام می‌گیرد، در نتیجه بارگذاری حرارتی را می‌توان به عنوان یک روش سریع‌تر و آسان‌تر در بازرسی کشتی‌ها و سازه‌های دریایی بزرگ نیز استفاده نمود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا روش برش‌نگاری دیجیتال به عنوان یک ابزار مناسب برای بازرسی و اندازه‌گیری غیرمخرب عیوب معرفی گردید و همچنین اصول و مبانی آن به همراه معادلات حاکم و چگونگی تشکیل هاله‌ها نیز توضیح داده شد. سپس با تکیه بر مرور مطالعات و تحقیقات گذشته، کاربرد برش‌نگاری در ارزیابی ترک‌های زیرسطحی و سطحی در مواد مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. با بررسی‌های انجام شده، نشان داده شد که می‌توان از برش‌نگاری دیجیتال به عنوان یک روش غیرتماسی و سریع برای بازرسی ترک‌هایی که از سطح جسم قابل رویت نیستند، استفاده نمود. همچنین علاوه بر بازرسی و تشخیص کیفی ترک‌ها، کاربرد برش‌نگاری به عنوان یک روش کارآمد در تخمین کمی اندازه و عمق ترک‌ها با تکیه بر روش‌های استخراج فاز و الگوهای فازی، اثبات شد. علاوه بر روش‌های مبتنی بر استخراج نقشه‌های فازی، با توجه به تاثیر پارامترهای اصلی برش‌نگاری شامل اندازه بارگذاری، فاصله برش و اندازه عیب بر تشکیل الگوهای هاله‌ای، می‌توان با یافتن ارتباط بین این پارامترها با تعداد و تراکم هاله‌ها، طول و عمق ترک‌ها را محاسبه نمود. اثرات هر کدام از پارامترهای اصلی از جمله بارگذاری و فاصله برش بر توانایی تشخیص ترک‌ها در مواد فلزی و مواد مرکب به‌طور جداگانه مورد بحث و بررسی قرار گرفت که بر اساس آن هرچه جهت برش با زاویه قرارگیری ترک به ۹۰ درجه نزدیک‌تر باشد، ترک‌هایی در عمق بیشتر و اندازه کوچک‌تر را می‌توان شناسایی نمود. همچنین با استفاده از تعریف نسبت بی‌بعدی از بارگذاری، مقادیر بهینه‌ای از پارامترها برای بازرسی مواد مرکب تقویت شده با الیاف شیشه تعیین شد که این مقادیر بسته به هندسه و جنس ماده مورد ارزیابی می‌تواند تفاوت داشته باشد. علاوه بر بررسی کاربردهای برش‌نگاری در

- Thesis, Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran.
- [25] H. Lopes, F. Ferreira, J. V. Araújo, P. Moreno-García, Localization of damage with speckle shearography and higher order spatial derivatives.
- [26] Hung Y Y and Liang C Y, (1979). Image shearing camera for direct measurement of surface strains Appl. Opt.
- [27] Melvin, L. D., Childers, B. A., & Fulton, J. P. (1993). Quantitative analysis of a class of subsurface cracks using shearography and finite element modeling. In Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (pp. 403-410). Springer, Boston, MA.
- [28] Carlsson, T. E., & Wei, A. (2000). Phase evaluation of speckle patterns during continuous deformation by use of phase-shifting speckle interferometry. Applied optics, 39(16), 2628-2637.
- [29] Liu, Z., Gao, J., Xie, H., & Wallace, P. (2011). NDT capability of digital shearography for different materials. Optics and lasers in Engineering, 49(12), 1462-1469.
- [30] Liu, H., Guo, S., Chen, Y. F., Tan, C. Y., & Zhang, L. (2018). Acoustic shearography for crack detection in metallic plates. Smart Materials and Structures, 27(8), 085018.
- [31] Akbari, D., & Soltani, N. (2013). Investigation of loading parameters in detection of internal cracks of composite material with digital shearography. World Applied Sciences Journal, 21(4), 526-535.
- [32] Mohamadi, M., & Akbari, D. (2015). Evaluation of sub-surface cracks in polymer matrix composites with laser interferometric method. International Journal of Manufacturing Engineering, 2(3), 11-23.
- [33] Kang, K. S., Kim, K. S., Jung, H. C., & Jang, H. S. (2006). Influence of shearing amount on detecting crack-shaped internal defect by shearography. In Key engineering materials (Vol. 321, pp. 112-115). Trans Tech Publications Ltd.
- [34] G. L. Cloud: Optical Methods of Engineering Analysis (Cambridge Univ. Press, London 1990)
- [35] Kim, K. S., Kang, K. S., Kang, Y. J., & Cheong, S. K. (2003). Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography. Optics & Laser Technology, 35(8), 639-643.
- [13] Livingston, R. (2007). Laser Shearography for Detection of Fine Cracks in Concrete and Masonry. INTERNATIONAL SAMPE SYMPOSIUM AND EXHIBITION.
- [14] Motamedi, R. (2008). Crack detection in silicon wafers using shearography (Doctoral dissertation, Concordia University).
- [15] Wang, Y., Gao, X., Xie, X., Wu, S., Liu, Y., & Yang, L. (2016). Simultaneous dual directional strain measurement using spatial phase-shift digital shearography. Optics and Lasers in Engineering, 87, 197-203.
- [16] Yang, F., Ye, X., Qiu, Z., Zhang, B., Zhong, P., Liang, Z., ... & Zhu, S. (2017). The effect of loading methods and parameters on defect detection in digital shearography. Results in physics, 7, 3744-3755.
- [۱۷] آقاجعفری، احسان و اکبری، داود، ۱۳۹۷، بررسی عیوب در مواد پلیمری تحت بار به کمک روش تداخل سنجی برشی دیجیتال، پانزدهمین کنفرانس ملی و چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی ساخت و تولید، تهران، <https://civilica.com/doc/837899>
- [18] Tizmaghz Nejad, M., Akbari, D., & Tirband, H., (2021). "Detection of Sub-Surface Defects in Polymer Materials Using Digital Shearography Method with Different Loading and Set-up Parameters."
- [19] Tizmaghz Nejad, M., Akbari., & Ghobadi, Sh., (2021). " Application of Digital Shearography Technique for Crack Inspection in Carbon-Fiber and Glass-Fiber Reinforced Polymers."
- [۲۰] آسمانی، ح.، و حقیقی، ع.، و رزقی ملکی، ه.، و سلطانی، ن. (۱۳۹۹). بررسی قابلیت روش برهم نگاری لیزری به منظور بازرسی غیر مخرب. فناوری آزمون های غیرمخرب، ۲(۷)، ۱۲۷-۱۲۱. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=561505>
- [۲۱] بناکار، ف. (۱۳۹۷). بررسی روش تداخل سنجی برشی در تشخیص عیوب در مواد مختلف. فناوری آزمون های غیرمخرب، ۲(۳)، ۲۲-۸. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=543898>
- [22] Zhao, Q., Dan, X., Sun, F., Wang, Y., Wu, S., & Yang, L. (2018). Digital shearography for NDT: phase measurement technique and recent developments. Applied Sciences, 8(12), 2662.
- [23] Michael, Y.Y.Hung (2002). Nondestructive Testing Using Shearography. Recent advances in Mechanic, 397-408.
- [24] Akbari, D., (2012). Development and Application of Non-Destructive Testing of Digital Shearography in Evaluation of Defects in Composite Materials, Ph.D.