تحلیل تجربی تنش با پردازش تصاویر دیجیتال

رسول محرمی[1]، سیده فایزه موسوی[2]

۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، r_moharami@znu.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۰۸

چکیده

امروزه تحلیل تجربی تنش مورد توجه بسیاری از پژوهشگران رشته‌های فنی و مهندسی، به‌ویژه مهندسی مکانیک قرار گرفته است. به‌دلیل وجود ساده‌نگری در خواص مواد، هندسه و بارگذاری در تحلیل‌های نظری و از طرف دیگر پیچیدگی هندسهٔ قطعات و شرایط بارگذاری واقعی، نیاز به داشتن اطلاعات صحیح‌تر از توزیع تنش در قطعات بارگذاری همواره وجود دارد. طی دو دههٔ گذشته، پیشرفت‌های چشمگیری در دنیای رایانه و انفورماتیک صورت پذیرفته و این فناوری به‌صورت پردازش تصاویر دیجیتال به دیگر حوزه‌های علمی همچون پزشکی، نقشه‌برداری، بازرسی صنعتی و تحلیل تجربی تنش وارد شده است. در این مقاله به معرفی کاربرد پردازش تصاویر دیجیتال در تحلیل تجربی تنش به‌عنوان یک روش اپتیکی و غیرتماسی پرداخته شده است و الگوریتم پرکاربرد آنالیز همبستگی تصاویر دیجیتال معرفی می‌شود. با استفاده از تصویرپردازی و آنالیز داده‌های دیجیتال می‌توان میدان جابه‌جایی روی یک قطعهٔ صنعتی را به‌دست آورد و با استفاده از میدان جابه‌جایی به میدان کرنش در قطعه رسید و با استفاده از روابط الاستیسیته، میدان توزیع تنش در قطعات را به‌دست آورد.

واژگان کلیدی: تحلیل تجربی، تنش، الگوریتم همبستگی، دیجیتال، پردازش تصاویر

۱. مقدمه

در بررسی‌های مهندسی، در برخی موارد مسائل تحلیل تنش پیچیده می‌شود و در آن راه‌حل‌های نظری به‌علت طولانی یا دشواری غیرعملی می‌شوند. حتی ممکن است مسئله‌ای حل نظری داشته باشد، اما لازم باشد نتایج آن با روش‌های تجربی مطابقت داده شود. روش‌های تجربی به‌دلیل داشتن شرایط واقعی و در نظر گرفتن کامل مسئله در تحلیل تنش اطلاعات دقیق‌تری نسبت به روش‌های عددی و تحلیلی به‌دست می‌دهند. در نتیجه می‌توان گفت استفاده از روش‌های آزمایشی بخش عمده‌ای از دانش مقاومت مصالح را تشکیل می‌دهد و توسعهٔ روش‌های تجربی در تحلیل تنش از موضوعات مورد علاقهٔ مهندسان به‌ویژهٔ مهندسان مکانیک می‌باشد. پردازش تصاویر بیشتر به موضوع پردازش تصویر دیجیتال اشاره دارد و شاخه‌ای از دانش کامپیوتر است که با آنالیز و پردازش سیگنال دیجیتال سروکار دارد. دانش پردازش تصاویر دارای دو شاخهٔ عمده بهبود تصاویر و بینایی ماشین است. بهبود تصاویر در برگیرندهٔ روش‌هایی چون استفاده از فیلتر محوکننده و افزایش

تضاد برای بهبود کیفیت دیداری تصاویر و اطمینان از نمایش درست آنها در محیط مقصد (مانند چاپگر یا نمایشگر) است، در حالی‌که بینایی ماشین به روش‌هایی می‌پردازد که به‌کمک آنها می‌توان معنا و محتوای تصاویر را درک کرد تا از آنها در کارهایی چون شناسایی و معرفی جسم به ماشین استفاده شود. اغلب روش‌های پردازش تصویر شامل آنالیز تصویر به‌عنوان یک سیگنال دوبعدی و به‌کار بستن تکنیک‌های استاندارد پردازش سیگنال بر روی آنها می‌شود؛ به‌صورتی‌که ورودی آن یک تصویر دیجیتال و خروجی آن تصویر یا اطلاعات محتوایی تصویر است. با استفاده از این تکنیک و دنبال‌کردن موقعیت نقاط مشخص روی سطح قطعه می‌توان میدان جابه‌جایی در اثر بارگذاری انجام را به‌دست آورد. این تکنیک بی‌نیاز از تماس است؛ به‌کارگیری آن از نظر وسائل مورد نیاز ساده و زمان آماده‌سازی قطعه نسبت به سایر روش‌های کرنش‌سنجی مرسوم کوتاه است [۱]. تجهیزات مورد نیاز در این روش شامل یک دوربین دیجیتال جهت تصویربرداری و یک نرم‌افزار برای انجام پردازش و آنالیز تصاویر و محاسبات و تحلیل نتایج می‌باشد. همچنین یک منبع نور در این روش برای نورپردازی جهت افزایش کیفیت تصویرها نیاز است. از محدودیت‌های این روش می‌توان به هزینهٔ بالای تجهیزات و حساسیت زیاد به نحوهٔ طرح‌ریزی و انتخاب الگوها اشاره کرد. همچنین هر لرزشی در نمونه یا دوربین حین انجام آزمایش یا تغییرات شدت نور محیط آزمایش سبب بروز خطا و عدم اطمینان به نتایج می‌گردد.

در این مقاله به معرفی کاربرد پردازش تصاویر دیجیتال در تحلیل تجربی تنش به‌عنوان یک روش اپتیکی و غیرتماسی پرداخته شده است. برای محاسبهٔ جابه‌جایی سطحی اجسام در اثر بارگذاری روش‌ها و الگوریتم‌هایی مورد استفاده بوده که در ادامه الگوریتم پرکاربرد آنالیز همبستگی تصاویر دیجیتال و استفاده از آن برای تحلیل جابه‌جایی سطح جسم معرفی می‌شود.

۲. تاریخچه

همواره اندازه‌گیری کرنش و محاسبهٔ تنش به‌صورت میدانی با استفاده از روش‌های غیرتماسی مورد توجه بوده است. در این زمینه روش‌های متنوعی توسعه یافته‌اند که از جملهٔ آنها می‌توان به تکنیک ماره[۱]، هلوگرافی[۲]، برش‌نگاری دیجیتال[۳] و آنالیز همبستگی تصاویر دیجیتال[۴] اشاره کرد. در این بین روش‌های مبتنی بر پایهٔ پردازش تصاویر دیجیتال به‌دلیل ویژگی‌های اشاره‌شده در بخش قبلی مورد توجه خاص برخی از محققان بوده است.

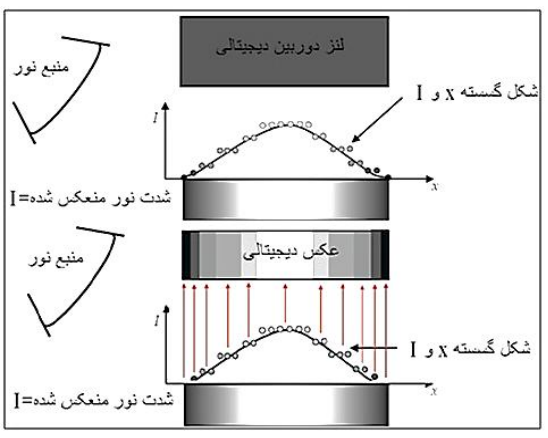
برایتون (۲۰۰۶) برای نخستین‌بار در مورد چند قطعهٔ فلزی با استفاده از پردازش تصویر موفق به اندازه‌گیری تغییر شکل صفحه‌ای شد و دورهٔ جدیدی از کاربرد تصاویر دیجیتال در تحلیل تجربی تنش را بنا نهاد [۲]. در ادامه، آسترل و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از جعبه‌ابزار پردازش تصویر نرم‌افزار متلب و ارائهٔ الگوریتمی خاص، حفره‌های روی سطوح فلزات ناصاف را ردگیری و کرنش را با تقریب کم استخراج نمودند [۳]. نیکولا و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از تکنیک ماشین بینایی و افزایش شدت تصویر دیجیتال در اندازه‌گیری تغییرات سطح قطعه و با مقایسهٔ تصاویر حاصل از نمونه در وضعیت‌های مختلف، به اندازه‌گیری جابه‌جایی نقاط سطح ماده پرداختند [۴].

لمن (۲۰۰۸) نیز با معرفی تکنیک همبستگی تصاویر و استفاده آن در یک نرم‌افزار سادهٔ تدوین عکس، محاسبهٔ کرنش را در یک نمونه را گسترش داد [۵]. ویژگی خاص این پژوهش تهیهٔ الگوریتمی جهت به‌کارگیری در دو منطقهٔ الاستیک و پلاستیک نمونه برای اولین‌بار بود. راکس (۲۰۰۹) نیز این تکنیک را برای بررسی رفتار شکست یک ترک دوبعدی و سه‌بعدی در قطعه استفاده نمود [۶]. آمدیو و همکاران (۲۰۱۰) از یک روش نوین همبستگی تصاویر دیجیتال برای تحلیل تجربی تنش روی یک قطعه بهره گرفتند که مهم‌ترین مزیت این روش آماده‌سازی بسیار آسان نمونه با ردگیری لکه‌های رنگ با استفاده از دوربین عکاسی دیجیتال می باشد [۷]. تائو (۲۰۱۰) نیز از شیوهٔ غیرتماسی اندازه‌گیری کرنش و سیستم کنترل بر پایهٔ شیوهٔ همبستگی عکس‌های دیجیتال برای تست خستگی مواد استفاده کرد [۸]. شاخص کار تائو ثبت کرنش در زمان‌های مختلف در طول پدیدهٔ خستگی به‌منظور بررسی رفتار پلاستیکی نمونه مورد نظر بود. یانگ و همکاران (۲۰۱۰) نیز با معرفی روش همبستگی تصایر دیجیتال مشکل ضعف ردگیری الگوهای دست‌ساز بر روی نمونه را برطرف کردند [۹]. آنها با استفاده از این روش جدید الگوهای ایجادشده موجود در روی سطوح چند نمونهٔ مختلف را ردگیری کردند و توانستند کرنش دقیق‌تری را نسبت به دیگر تحقیقات قبلی ارائه دهند. علاوه بر مراکز تحقیقاتی دانشگاهی، واحدهای تحقیقاتی صنعتی و شرکت‌ها نیز

به‌صورت مستمر در ارتباط با توسعهٔ بخش‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری این تکنیک فعال هستند، که از آن جمله می‌توان به شرکت‌های کوریلیتد سولوشنز[۵]، ال. آ ویژن[۶] و نی. اس. ام. ویژن[۷] اشاره کرد. بررسی تاریخچهٔ این تکنیک از گذشته تا به‌حال نشان‌دهندهٔ قابلیت استفاده روش بررسی همبستگی دیجیتال تصاویر، در حوزه‌های متنوع مهندسی مکانیک می‌باشد. از جمله پیشرفت‌های نوین این تکنیک در حوزهٔ مهندسی مکانیک امکان پایش به‌هنگام کرنش و تنش برروی سطح قطعات در حین کار از راه دور و بررسی سلامت سازه‌های تحت بار است. همچنین استفاده از این تکنیک در حوزهٔ مکانیک شکست و تعیین برخی خواص مکانیکی مواد از نوآوری‌های دیگر محققان در این حوزه می‌باشد [۱۰-۱۱].

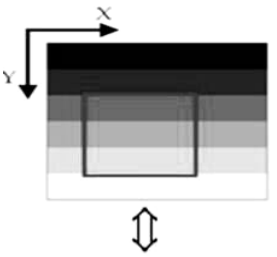
۳. تصویر دیجیتالی[۸]

هر تصویر را می‌توان یک تابع دوبعدی مانند F(x,y) در نظر گرفت، که در آن (x,y) مختصات مکانی[۹] و F شدت یا سطح خاکستری تصویر[۱۰] در نقطهٔ x,y می باشد. وقتی x,y و مقادیر F متناهی و کمیت‌هایی گسسته باشند، تصویر را تصویر دیجیتال می‌نامند. در صورت وجود منبع نور مناسب و عدم حرکت جسم، گراف الگوی شدت نور منعکس‌شده از جسم به‌صورت پیوسته و ثابت نسبت به زمان بوده و دوربین دیجیتالی این گراف پیوسته را مطابق شکل ۱ به‌صورت گسسته برداشت و ثبت می‌کند.



شکل ۱. گراف گسستهٔ تصویر دیجیتال

در واقع تصاویر دیجیتال از تعداد زیادی مربع کوچک[۱۱] تشکیل شده‌اند. هر پیکسل دارای یک شمارهٔ رقمی[۱۲] است که بیانگر مقدار روشنایی آن پیکسل است. هر تصویر دیجیتال را می‌توان ماتریسی دوبعدی در نظر گرفت که در آن محل سطر و ستون‌ها مختصات مکانی پیکسل مورد نظر و مقدار هر عنصر از آرایه نشان‌دهندهٔ شدت روشنایی تصویر در آن نقطه است. مطابق شکل ۲، هر عنصر آرایه یک مقدار ۸ بیتی است که می‌تواند مقداری بین صفر و ۲۵۵ داشته باشد. مقدار صفر نشان‌دهندهٔ رنگ تیره (سیاه) و مقدار ۲۵۵ نشان‌دهندهٔ رنگ روشن (سفید) است [۱۲].



$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 51 & 51 & 51 & 51 & 51 & 51 \\ 102 & 102 & 102 & 102 & 102 & 102 \\ 153 & 153 & 153 & 153 & 153 & 153 \\ 204 & 204 & 204 & 204 & 204 & 204 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \end{bmatrix}$$

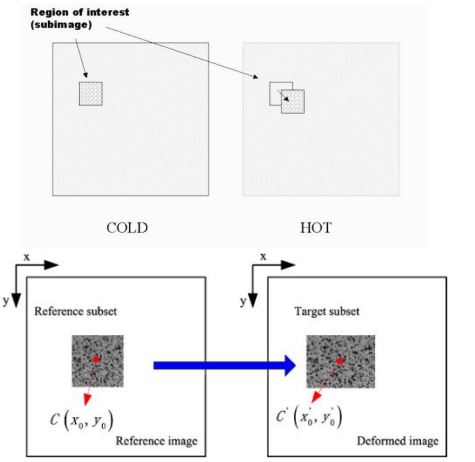
شکل ۲. یک نمونه تصویر دیجیتال و ماتریس مشخصه آن

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، پردازش تصاویر دیجیتال شامل تحلیل و بررسی ماتریس مشخصه شکل بوده و خروجی آن می‌تواند یک ماتریس شکل و یا اطلاعاتی استخراج‌شده از آن باشد.

٤. معرفی روش برهم‌نگاری تصاویر

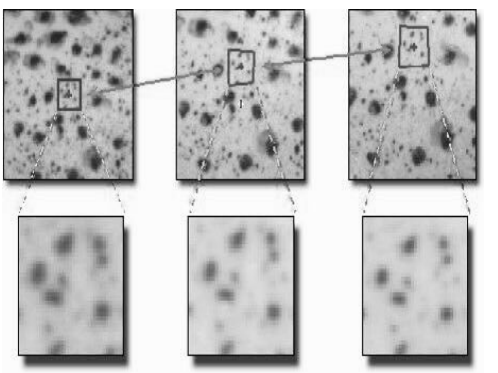
از جمله روش‌های نوین در محاسبهٔ تنش و محاسبات مکانیکی استفاده از پردازش تصاویر است. در این روش از تغییرات تصاویر گرفته‌شده از نمونه قبل و بعد از بارگذاری استفاده می‌شود. با مقایسهٔ این تصاویر موقعیت جدید نقاط مشخصی روی سطح قطعه دنبال و محاسبه شده و جابه‌جایی آن نقطه در قطعه در اثر بارگذاری به‌دست می‌آید. با تکرار این فرایند برای دیگر نقاط روی قطعه میدان جابه‌جایی قابل محاسبه بوده و با استفاده از میدان جابه‌جایی می‌توان به میدان کرنش در قطعه رسید و با به‌کارگیری از روابط الاستیسیته توزیع و مقدار تنش در یک نقطه یا کل قطعه را به‌دست آورد. برای مثال در شکل ۳ المان نشان داده شده تحت یک بار حرارتی دچار تغییر مکان شده که

با استفاده از تشخیص این تغییر مکان می‌توان کرنش‌ها و تنش‌های ایجادشده در قطعه را به‌دست آورد [۱۳].



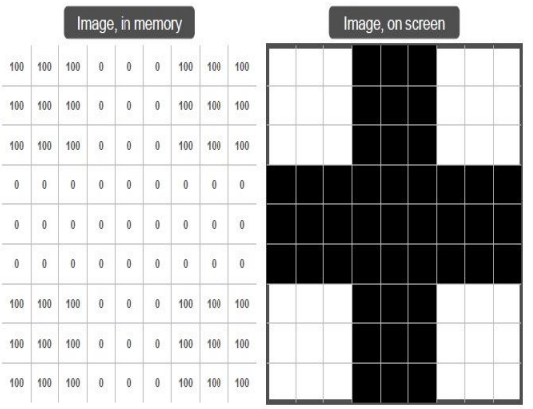
شکل ۳. جابه‌جایی یک المان تحت یک بار حرارتی

در روش همبستگی دیجیتال تصاویر الگوهای نقطه‌ای تصادفی (مثل نقاط سیاه و سفید) در سطح نمونهٔ آزمایش انتخاب می‌شوند. این الگوها (تصویرها) یکی قبل از تغییر شکل نمونهٔ مورد نظر و الگوهای دیگر بعد از تغییر شکل نمونه در جریان آزمایش تهیه و پس از دیجیتالی‌شدن وارد کامپیوتر می‌شوند. در مرحلهٔ بعد، تصاویر دیجیتال‌شده با هم مقایسه می‌شوند. این روش مطابق شکل ۴ از تغییرات تصاویر گرفته‌شده از نمونه قبل و بعد از بارگذاری استفاده می‌کند. با مقایسهٔ تصاویر گرفته‌شده قبل و بعد از بارگذاری جابه‌جایی نقاط مشخصی روی سطح قطعه محاسبه شده و کرنش در قطعه به دست می‌آید [۱۴].

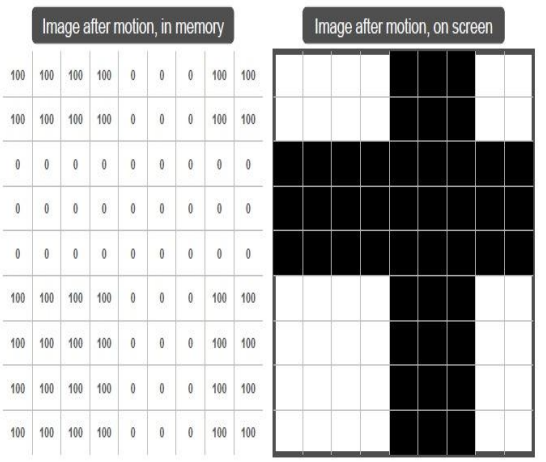


شکل ٤. دنبال‌کردن نقطهٔ معین برای رسیدن به میدان جابه‌جایی

برای توضیح بیشتر در اینباره، روش با ذکر یک مثال ارائه می‌گردد. ماتریس نشان داده شده در شکل ۵ متعلق به یک تصویر با سایز ۹×۹ است. نمونه پس از بارگذاری یک پیکسل به راست و یک پیکسل به بالا جابه‌جا شده است.



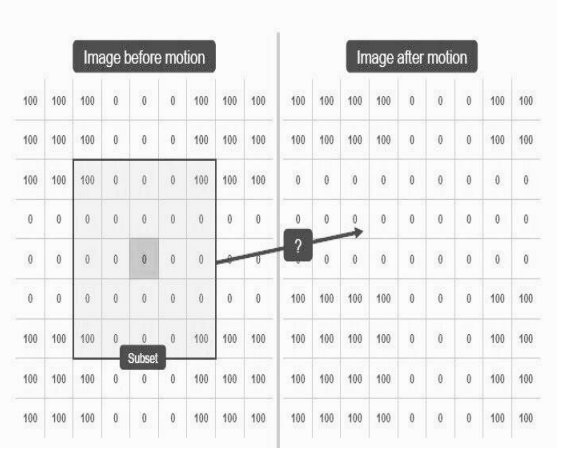
شکل ۵. ماتریس تشکیل‌دهندهٔ یک تصویر ۹×۹



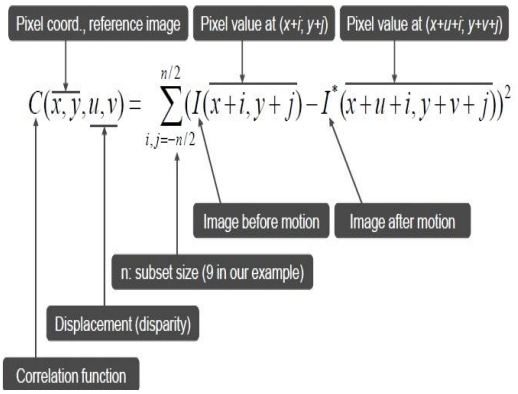
شکل ٦. جابه‌جایی یک پیکسل به بالا و یک پیکسل به راست

الگوریتم همبستگی به این صورت عمل می‌کند که موقعیت زیرمجموعه مورد بررسی در تصویر اولیه با استفاده از تطابق شدت نور خاکستری در تصویر ثانویه جستجو می‌شود و برای هر نقطه یک مقدار از لحاظ شدت نور خاکستری محاسبه می‌شود. در نتیجه می‌توان نقاطی را در تصویر ثانویه یافت که بیشترین تطابق را با نقاط زیرمجموعه تصویر اولیه دارند. با استفاده از تابع همبستگی[۱۳] می‌توان جایی را که بیشترین تطابق را با تصویر اولیه دارد پیدا کرد. به بیان ساده‌تر مطابق شکل ۷ یک الگوی ۵×۵ در عکس مرجع انتخاب شده و این الگو در عکس بعدی ردگیری می‌شود. برای اینکه بتوان از نتایج تئوری الاستیسیته در این روش استفاده کرد، فرض می‌شود که ابعاد پیکسل به اندازهٔ کافی کوچک باشد. به‌گونه‌ای که بتوان از روابط به‌دست آمده از

تئوری الاستیسیته در یک نقطه برای یک پیکسل استفاده کرد. با استفاده از تابع همبستگی (شکل ۸) می‌توان جایی که بیشترین تطابق را با تصویر اولیه دارد پیدا کرد. بدین ترتیب که کمترین مقدار برای این تابع به‌معنای بیشترین شباهت و تطابق با تصویر مرجع است. در واقعیت به‌خاطر نوفه‌های مزاحمی که وجود دارد نمی‌توان به اختلاف صفر دست یافت (تابع همبستگی صفر را نشان نمی‌دهد). البته اگر تراکم نقاط در تصویر مرجع افزایش یابد، نوفه‌های نتایج به‌طرز چشمگیری کاهش می‌یابند. این کار دقت روش را بالا می‌برد، اما متعاقباً مدت زمان پردازش افزایش یافته و به سیستم‌های پردازشگر قوی‌تری نیاز خواهد داشت [۱۵].



شکل ۷. ردگیری الگوی انتخابی در عکس مرجع



شکل ۸ تابع همبستگی مورد استفاده در این تکنیک

محاسبهٔ مقدار تابع همبستگی و تکرار آن برای نقاط مورد نظر در تصویر دیجیتال مورد آنالیز توسط برنامه‌نویسی کامپیوتری انجام می‌گیرد. امروزه در برخی نرم‌افزارها این محاسبات را در قالب یک بخش از قبل آماده‌شده ارائه شده است.

۵. مراحل انجام آزمایش

۵-۱. ایجاد الگوی تصادفی روی سطح نمونه

باید بر روی سطح نمونه یک الگوی لکه‌ای تصادفی یا نامنظم ایجاد شود. با تعقیب این لکه‌های تصادفی در تصویرهای متوالی می‌توان به میدان جابه‌جایی دست یافت. یکی از روش‌های سادهٔ ایجاد الگوهای تصادفی بر روی سطح قطعات پاشش غیرمنظم رنگ روی سطح مورد نظر می‌باشد. در این روش، که به روش‌های مختلف امکان اجرای آن وجود دارد، روی سطح لکه‌های رنگ با ابعاد و موقعیت تصادفی ایجاد می‌شود. در مواردی نیز می‌توان با استفاده از چند رنگ مختلف لکه‌هایی با رنگ‌های متفاوت روی سطح ایجاد کرد که این حالت امکان دنبال‌کردن لکه‌هایی با رنگ‌های مختلف را فراهم نموده و قابلیت روش را ارتقا می‌دهد. در شکل ۹ نمونه‌ای از اجرای این عملیات نمایش داده شده است.

شکل ۹. ایجاد الگوی تصادفی توسط رنگ پاشی

برای داشتن الگوی قابل استفاده علاوه بر روش نشان داده شده در شکل ۹، می‌توان از الگوهای طبیعی و مصنوعی روی قطعات نیز استفاده کرد.

۵-۲. چیدمان دستگاه و تنظیم تجهیزات

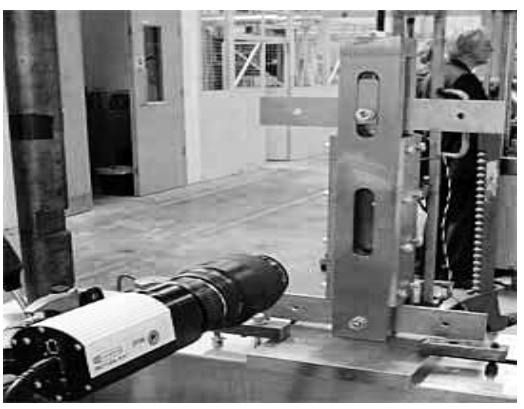
مطابق شکل ۱۰ تجهیزات مورد نیاز در این روش شامل یک دوربین دیجیتال با فریم بالا جهت تصویربرداری و یک نرم‌افزار برای انجام برهم‌نگاری و محاسبات و تحلیل می‌باشد. در این روش، یک منبع نور نیز برای نورپردازی جهت افزایش کیفیت

تصویرهای گرفته‌شده مورد نیاز است. نکتهٔ قابل توجه در این روش اینکه باید تمامی وسائل روی صفحات جاذب ارتعاش نصب شوند تا هنگام انجام آزمایش دوربین و سایر تجهیزات هیچ‌گونه حرکتی نداشته باشند که در غیر این‌صورت به نتایج آزمایش نمی‌توان اعتماد کرد.

شکل ۱۰. تجهیزات مورد نیاز روش DIC

۵-۳. گرفتن تصویر حین بارگذاری

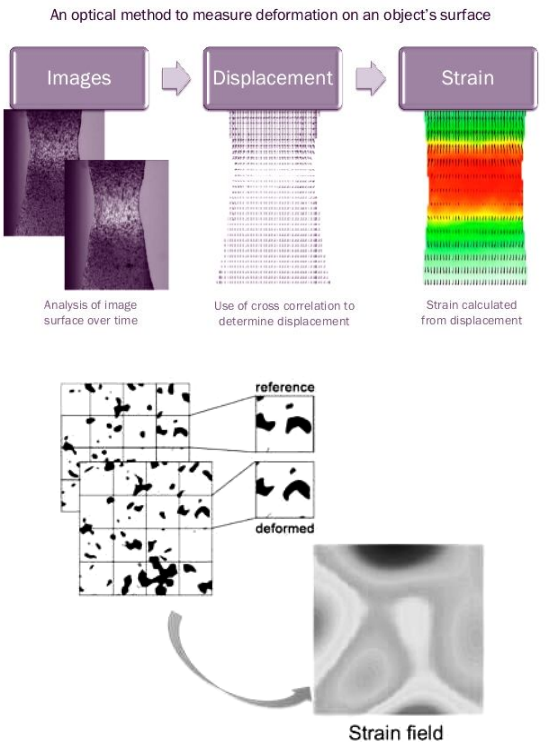
پس از گرفتن تصویر مرجع، با شروع فرایند بارگذاری در زمان‌های مطلوب (در بارهای مورد نظر) تصویربرداری شروع می‌شود. در صورتی‌که نرخ تغییرات کوچک باشند، تعداد کمی تصویر مورد نیاز است که به‌صورت دستی می‌توان این تصویرها را گرفت. اگر زمان بین تصویرها اهمیت داشته باشد و یا به مقدار زیادی تصویر مورد نیاز باشد، می‌توان با یک برنامهٔ کامپیوتری و دوربین اتوماتیک این کار را انجام داد. مطابق شکل ۱۱ هنگام گرفتن تصویرها باید تا حد امکان از حرکت کردن یا جابه‌جاکردن اجسام در محل آزمایش خودداری کرد [۱۷].



شکل ۱۱. تصویربرداری با دوربین فریم بالا [۱۷]

۵-۴. مقایسهٔ تصاویر حاصل و انجام برهم‌نگاری

در ابتدا یک ناحیه از تصویر قبل از بارگذاری انتخاب می‌شود. این ناحیه، همان ناحیهٔ مطلوب برای به‌دست آوردن میدان جابه‌جایی است. ناحیهٔ منتخب در تصویر قبل از بارگذاری باید به‌طور کامل در تصویر بعد از بارگذاری قرار گیرد. در روش DIC قسمت اصلی، پردازش تصاویر بوده که توسط نرم‌افزار صورت می‌پذیرد. برای این منظور تصاویر به‌صورت ماتریس در نرم‌افزارها تعریف می‌شوند. سپس ماتریس تصاویر قبل و بعد از بارگذاری توسط نرم‌افزار مقایسه می‌شود تا میدان جابه‌جایی قطعه طی فرایند بارگذاری به‌دست آید. چون مقدار درایه‌های ماتریس برابر شدت نور نقاط می‌باشد و این مقدار در طی بارگذاری تغییر نمی‌کند و تنها محل آن تغییر می‌کند، نرم‌افزار با استفاده از این مقدار ثابت در درایه‌ها به مقایسهٔ درایه‌ها پرداخته و تغییر درایه‌ها یافته و بدین ترتیب مقدار جابه‌جایی به‌دست می‌آید. سپس نرم‌افزار با توجه به برنامه‌نویسی صورت گرفته براساس تئوری الاستسیته با استفاده از میدان جابه‌جایی به‌دست آمده، تنش‌های قطعه را محاسبه نموده و به‌صورت خروجی نمایش می‌دهد.



شکل ۱۲. انجام آنالیز برهم‌نگاری

٦. نتیجه‌گیری

امروزه تحلیل تجربی تنش با پردازش تصاویر دیجیتال به‌عنوان یک روش نوری در حوزه‌های مهندسی مکانیک، به‌ویژه در حوزهٔ تحلیل تجربی تنش کاربردهای فراوانی دارد. نتایج حاصل از

روش DIC با نتایج تحلیلی و روش‌های تجربی دیگر انطباق مناسبی دارند. با کالیبراسیون دوربین و استفاده از دوربین‌های صنعتی بهتر می‌توان خطای این روش را به حداقل رساند. اگرچه این روش دقت و توجه فوق‌العاده می‌طلبد، اما نتایج این روش به شرط مهیابودن تمامی شرایط محیطی و مراحل انجام آزمایش، قابل اعتماد و همچنین قابل رقابت با روش‌های رایج می‌باشد. روش برهم‌نگاری تصاویر یک روش میدانی مفید است که می‌توان کرنش را در هر موقعیت و جهت و راستای دلخواه به‌دست آورد. با افزایش تعداد تصاویر، افزایش تراکم نقاط در مرحلهٔ اول ایجاد الگوها، بهینه‌کردن فاصلهٔ قطعه کار از دوربین، استفاده از دوربین‌های با وضوح تصویر بالاتر[۱۴]، ثبات دوربین و قطعه‌کار در حین آزمایش و تأمین نور مناسب و یکنواخت هنگام تصویربرداری می‌توان دقت روش را افزایش داد. توجه محققان بر توسعهٔ تجهیزات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مورد استفاده در اجرای این تکنیک برای نیل به نتایج بهتر به معنای توسعهٔ کمی و کیفی تحلیل تنش با این روش می‌باشد.

۷. مآخذ

[1] Digital Image Correlation, http://www.dantecdynamics.com/digital-image-correlation (accessed August 30, 2016).

[2] Britton, Paul, and Jeff Loughran. "Application of image measurement and continuum mechanics to the direct measurement of two-dimensional finite strain in a complex fibro-porous material." *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics* 7, no. 2 (2006): 81-90.

[3] Austrell, Per-Erik, Bertil Enquist, Anders Heyden, and Sven Spanne. "Contact free strain measurement using MATLAB Image Processing Toolbox." In *Nordic MATLAB Conference, Stockholm*. 1995.

[4] Nicolella, Daniel P., Arthur E. Nicholls, James Lankford, and Dwight T. Davy. "Machine vision photogrammetry: a technique for measurement of microstructural strain in cortical bone." *Journal of biomechanics* 34, no. 1 (2001): 135-139.

[5] Lemmen, H. J. K., R. C. Alderliesten, R. Benedictus, J. C. J. Hofstede, and R. Rodi. "The power of Digital Image Correlation for detailed elastic-plastic strain measurements." In *WSEAS international conference on engineering mechanics, structures, engineering geology. Crate Island, Greece*. 2008.

[6] Roux, Stéphane, and F. Hild. "Digital image correlation and fracture: an advanced technique for estimating stress intensity factors of 2D and 3D cracks." *Journal of Physics D: Applied Physics* 42, no. 21 (2009): 214004.

[7] Amodio, D., G. B. Broggiato, E. Campana. "Digital Speckle Correlation for Strain Measurement by Image Analysis", *Society for Experimental Mechanics*, No.4, pp.05-112, (2010).

[8] Tao, G., Z. Xia. "A Non-Contact Real-Time Strain Measurement and Control System for Multiracial Cyclic/Fatigue Tests of Polymer Materials by Digital Image Correlation Method", 24th Annual Conf of the IEEE for Polymer Testing New York USA, pp. 844-855, (2010).

[9] PI, Lianxiang Yang, Lorenzo Smith, Mr Abhishek Gothekar, and Mr Xu Chen. "Measure Strain Distribution Using Digital Image Correlation (DIC) for Tensile Tests." (2010).

[10] Kamaya, Masayuki, and Masahiro Kawakubo. "A procedure for determining the true stress–strain curve over a large range of strains using digital image correlation and finite element analysis." *Mechanics of Materials* 43, no. 5 (2011): 243-253.

[11] Becker, T. H., M. Mostafavi, R. B. Tait, and T. J. Marrow. "An approach to calculate the J□integral by digital image correlation displacement field measurement." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 35, no. 10 (2012): 971-984.

[12] Digital Image Basics, www.dl-c.com/basics.pdf (accessed August 01, 2016).

[13] Wang, Zhaoyang, Hien Kieu, Hieu Nguyen, and Minh Le. "Digital image correlation in experimental mechanics and image registration in computer vision: similarities, differences and complements." *Optics and Lasers in Engineering* 65 (2015): 18-27.

[14] Digital Image Correlation, http://www.dantecdynamics.com/digital-image-correlation (accessed August 12, 2016).

[15] Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software, Seminar of University of South Carolina, Correlated solutions, Inc, (2009).

[16] Peters, W. H., and W. F. Ranson. "Digital imaging techniques in experimental stress analysis." *Optical engineering* 21, no. 3 (1982): 213427-213427.

[17] Gao, Jianxin, and Haixia Shang. "Deformation-pattern-based digital image correlation method and its application to residual stress measurement." *Applied optics* 48, no. 7 (2009): 1371-1381.

پی‌نوشت

1. Moiré
2. holography
3. digital shearography
4. digital image correlation
5. correlated solutions
6. LA Vision
7. KSM Vision
8. digitali
9. spatial
10. intensity
11. pixel
12. digital number
13. similarity score correlation function
14. resolution