

Investigating the Possibility of Crack Detection Using Digital Image Correlation with Laser Speckles

A. Haghighi*, H. Asemani, N. Soltani

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

*a.a.haghighi@ut.ac.ir

Abstract

Detecting structural defects such as cracking and corrosion is largely achieved by techniques such as eddy current and ultrasonic testing. For this purpose, these methods require point-by-point scanning over the area of interest. Digital image correlation provides a cheaper and quicker testing method. In this method, imaging of the surface of the structure is performed during loading and unloading by using a suitable camera. In the traditional digital image correlation, to tracking the surface, an artificial pattern should be created on the surface. Creating a suitable pattern on large surfaces is so difficult. With the use of the laser source, a random laser speckle can be created on the sample instead of an artificial pattern. In this paper, the detection of a crack in a polycarbonate plate is investigated. The amount of strain around the crack is more than in other areas, and this issue can be completely detected by the method of digital image correlation with laser speckle. If the structure can be loaded easily, this method is a quick test to identify cracks.

Keywords: Digital Image Correlation, Laser Speckle, Crack Detection.

بررسی امکان تشخیص ترک با استفاده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال با لکه‌های لیزر

عبدالرحمان حقیقی*، حمیدرضا آسمانی، ناصر سلطانی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
*a.a.haghighi@ut.ac.ir

چکیده

تشخیص عیوب ساختاری مانند ترک خوردگی و خوردگی بیشتر با تکنیک‌هایی مانند جریان گردابی و فراصوتی انجام می‌شود. برای این منظور نیاز است که منطقه موردنظر به صورت نقطه‌به‌نقطه روبش شود. با روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال می‌توان به صورت سریع‌تر و ارزان‌تر آزمون ترک‌یابی سطحی را انجام داد. در این روش با استفاده از یک دوربین مناسب تصویربرداری از سطح سازه در حالت‌های بارگذاری شده و بدون بار انجام می‌شود و با برهم‌نگاری تصاویر میدان‌های جابجایی و کرنش استخراج می‌شود. در روش برهم‌نگاری تصویر دیجیتالی رایج به منظور ردیابی سطح، یک الگوی مصنوعی روی سطح ایجاد می‌شود و ایجاد این الگو روی سطوح بزرگ کار مشکلی است. با الگوی لیزری نیازی به ایجاد الگوی مصنوعی روی سطح نیست. در این مقاله، یک ترک در یک صفحه پلی‌کربنات مورد بررسی قرار گرفته است و نشان داده شده که مقدار کرنش در اطراف ترک بیش از نواحی دیگر است و این موضوع با روش برهم‌نگاری تصویر دیجیتالی با الگوی لیزر، کاملاً قابل تشخیص است. در صورتی که بتوان به راحتی سازه را بارگذاری کرد، این روش یک آزمون سریع برای شناسایی ترک‌ها می‌باشد.

کلمات کلیدی: روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی، الگوی لکه‌ای لیزری، شناسایی ترک.

۱- مقدمه

در حال حاضر، تشخیص ترک‌ها در سازه‌ها اغلب توسط آزمون‌های غیرمخرب^۱ (NDT) و با استفاده از تکنیک‌هایی مانند جریان‌های گردابی^۲ و فراصوتی^۳ به دست می‌آید. به منظور بررسی یک سازه بزرگ، استفاده از این روش‌ها بسیار زمان‌بر است زیرا این تکنیک‌ها نیاز به اسکن نقطه‌به‌نقطه در تمام منطقه موردنظر را دارند و به همین دلیل پرهزینه هم خواهد بود. استفاده از روش‌هایی نظیر مایعات نافذ^۴ نیز نیاز به آماده‌سازی سطح دارد و برای سطوحی بزرگ که دسترسی به آن‌ها مشکل است (مانند مخازن بزرگ، دیوار سد) به راحتی امکان‌پذیر نیست. در صورتی که بتوان با یک روش تمام میدان را به سرعت اسکن کرد میزان هزینه و زمان به صورت قابل توجهی (برای سازه‌های بزرگ) کم می‌شود.

محبوبیت تکنیک‌های اندازه‌گیری کامل میدان جابجایی و تنش در طی ۴۰ سال گذشته در زمینه مکانیک تجربی همواره در حال افزایش بوده است. روش‌های نوری مانند برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی^۵ (DIC) و روش‌های تداخل‌سنجی مانند تداخل‌سنجی هالوگرافی^۶ و تداخل الگوی نمونه^۷ و ... از جمله روش‌هایی هستند که برای این منظور استفاده می‌شوند. در این بین، تکنیک DIC به دلیل سادگی مفهوم و روش اجرای آن، به محبوب‌ترین روش اندازه‌گیری کامل میدان جابجایی و تنش تبدیل شده است.

مبنای DIC بر اساس تئوری جریان نوری است که با ثبت تصویر در طول بارگذاری و ردیابی سطح نمونه، اندازه‌گیری‌های کمی از شکل، جابجایی و کرنش را امکان‌پذیر می‌کند. برای انجام برهم‌نگاری بین دو تصویر گرفته شده، معمولاً الگوهای تصادفی روی سطح نمونه قبل

¹ non-destructive testing

² eddy current

³ ultrasonic

⁴ dye penetrant

⁵ Digital Image Correlation

⁶ Holographic Interferometry

⁷ Speckle-Pattern Interferometry

۲- مبانی اندازه‌گیری

۲-۱- روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال با الگوی لیزر DIC از تکنیک‌های پردازش تصویر برای به دست آوردن میدان‌های جابجایی و کرنش در یک منطقه موردنظر^۱ (ROI) از سطح نمونه استفاده می‌کند. هنگامی که پرتو منسجم لیزر از سطح ناصافی پراکنده شده و روی سطح دیگری قرار گیرد، لکه‌های لیزر تشکیل می‌شوند بنابراین، اگر یک دوربین دیجیتال در داخل میدان نور پراکنده واقع شود، می‌توان الگوهای لکه‌ای را که به‌عنوان نقاط روشن و تاریک دیده می‌شوند، به دست آورد [۸].

در الگوریتم DIC مبتنی بر زیردامنه‌ها (محلی) تصویر به دامنه‌های کوچکی تقسیم می‌شود و فرض می‌شود که تغییر شکل درون هر زیردامنه همگن است. برای تعیین میدان جابه‌جایی، یک زیردامنه از تصویر تغییر شکل داده نشده (تصویر مرجع) انتخاب می‌شود و سپس موقعیت آن در تصاویر تغییر شکل یافته ردیابی می‌گردد. ROI از زیرمجموعه‌های زیادی تشکیل شده است که با استفاده از آن‌ها می‌توان جابجایی سطح نمونه را تعیین کرد. به عبارت دیگر، الگوریتم DIC به این صورت است که کل دامنه که شامل تعدادی پیکسل است را در نظر می‌گیرد و شدت رنگ هر پیکسل دامنه را درون یک تابع می‌ریزد و در تصویر بعدی در حالت ایده آل به دنبال دامنه‌ای با همان تابع می‌گردد و به‌صورت عددی یک تابع هدف تعیین کرده و آن را کمینه می‌کند. در این الگوریتم‌ها زیردامنه‌ها به‌صورت مجموعه‌ای از نقاط پیوسته به‌صورت دایره و یا مربع هستند که بر روی تصویر مرجع با اعداد صحیحی از پیکسل‌ها قرار می‌گیرند. انتقال مختصات این نقاط از تصویر مرجع به تصویر جاری با یک نگاشت انجام می‌شود که این نگاشت در بعضی نرم‌افزارها درجه صفر دارد در بعضی دیگر درجه ۱ یا ۲ دارد.

استخراج میدان جابه‌جایی با استفاده از یک بهینه‌سازی غیرخطی به‌منظور پیدا کردن مینیمم مقدار تابع انجام می‌گیرد. برای این کار از الگوریتم‌های انطباق تصویر^۲ استفاده می‌شود. انطباق تصویر شامل حرکت و احتمالاً تغییر شکل الگویی برای به حداقل رساندن تفاوت بین الگو

از آزمایش تهیه می‌شود. رایج‌ترین الگوهای مورد استفاده از الگوهای مصنوعی هستند که معمولاً با پاشش رنگ روی سطح نمونه تهیه می‌شوند [۱-۳]. با این حال ضخامت رنگ‌ها و جداسازی آن‌ها از سطح ممکن است منجر به اندازه‌گیری نادرست کرنش‌های واقعی برای نمونه شود. ایجاد یک الگوی مصنوعی باکیفیت بر روی یک سطح بزرگ کار مشکلی است و بعضاً امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین، در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای استفاده از DIC بدون ایجاد الگوی مصنوعی و با استفاده از تابش لیزر بیش‌تر شده است [۴-۷].

لکه‌های لیزر در اثر بازتاب و پراکندگی تابش لیزر بر روی یک سطح خشن تشکیل می‌شوند، آناندر و همکاران [۸] یک سنسور کرنش غیر تماسی مبتنی بر لیزر ایجاد کردند که با ردیابی حرکت لکه‌های لیزر، جابجایی را تعیین می‌کند و منحنی تنش-کرنش آلیاژ آلومینیوم و مولیبدن را در دمای اتاق با موفقیت اندازه‌گیری کردند. هات و کاولی [۹] هم ترک اتصالات را با روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال و با ایجاد الگوی مصنوعی شناسایی کردند. سونگ و همکاران [۶، ۷] هم الگوریتم لکه‌های لیزر را برای اندازه‌گیری کرنش دمای بالا و هم ارزیابی کیفیت الگوهای لکه‌های لیزر را مطالعه کردند. ژنگ و همکاران [۴] تغییر شکل‌های بزرگ فلزات را با استفاده از DIC با لکه‌های لیزر با موفقیت ارزیابی می‌کردند. با این حال، هیچ‌یک از این مطالعات امکان تشخیص ترک را با الگوی لیزری بررسی نکردند.

هدف این مقاله بررسی امکان استفاده از DIC با الگوی لیزری برای تشخیص ترک‌ها می‌باشد. قطعه آزمون مورد استفاده یک ورق پلی‌کربنات است که یک ترک به‌وسیله برش لیزر به طول ۸ میلی‌متر روی آن ایجاد شده است. قطعه آزمون در یک دستگاه تست کشش بارگذاری شده است و با تاباندن لیزر از سطح نمونه تصویربرداری شده است. ترک‌ها منجر به تغییر در توزیع کرنش یا جهش در میدان جابجایی در طول ترک می‌شوند لذا با پردازش تصویر، کرنش قابل حصول و در نتیجه قابلیت تشخیص ترک در سطوح بار مختلف مشخص شده است.

¹ Region Of Interest

² Image alignment

میدان کرنش، روش گرین-لاگرانژ^۴ است که روابط آن به صورت زیر می باشد [۱۲].

$$E_{xx} = \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right) \quad (1)$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u \partial u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial v \partial v}{\partial x \partial y} \right) \quad (2)$$

$$E_{yy} = \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (3)$$

که در آن x و y جهت‌های مختصات، u و v به ترتیب مقدار جابه‌جایی در جهت x و y است و E_{xx} ، E_{xy} و E_{yy} مقادیر کرنش در صفحه xy است. مشتق جابجایی متقیماً از طریق الگوریتم گوس نیوتون به دست می‌آید؛ اما این مقادیر پر از نویز هستند، بنابراین باید قبل از محاسبه میدان کرنش به نوعی "صاف شوند"^۵. در مرجع [۱۳] روشی برای صاف کردن میدان کرنش پیشنهاد شده است که در الگوریتم‌های DIC مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش آن بدین صورت است که برای صاف کردن میدان جابه‌جایی در هر زیردامنه یک تابع بر آن برازش می‌شود.

۳- نمونه و تجهیزات آزمون

نمونه مورد آزمایش یک صفحه پلی کربنات با ضخامت ۳/۳ میلی‌متر، طول ۲۰۰ میلی‌متر و عرض ۵۰ میلی‌متر است. با استفاده از برش لیزر یک ترک مرکزی راه به در، هم‌راستای عرض نمونه و به طول ۸ میلی‌متر ایجاد شده است (مطابق شکل ۱).

شکل ۲ تجهیزات آزمون را نشان می‌دهد. برای اعمال نیروی کششی از یک دستگاه تست کشش با ظرفیت ۲ تن استفاده شده است. برای ایجاد الگوی لیزر از یک منبع لیزر قرمز با طول موج لیزر ۶۳۲/۸ نانومتر و توان ۳۰ میلی‌وات استفاده شده است. تصاویر با استفاده از یک دوربین CCD با رزولوشن ۳/۲ مگاپیکسل و یک لنز با فاصله کانونی ۵۰ میلی‌متر ثبت می‌شود.

و یک تصویر است. روش معمول برای انطباق تصویر حرکت در جهت کاهش تغییرات^۱ است.

برای تشکیل الگوهای لکه‌های لیزر، یک لیزر با قدرت مناسب و یک سطح زیر از نمونه اندازه‌گیری شده مورد نیاز است. در صورت بزرگ بودن قدرت لیزر، سطح نمونه بیش از حد روشن خواهد شد، در نتیجه اندازه نقاط تاریک کاهش می‌یابد [۷]. این امر می‌تواند باعث ردیابی و محاسبه نادرست تغییر مکان برای زیردامنه‌ها از تصویر اولیه به یک تصویر تغییر شکل یافته شود. زبری سطح یک نمونه بر اندازه ذرات لکه تأثیری چندانی ندارد [۷]، البته الگوهای لکه‌های لیزر را نمی‌توان در سطح صیقلی آینه‌ای با زبری کمتر از ۳۲ نانومتر ایجاد کرد [۱۰].

۲-۲- روش اندازه‌گیری کرنش

همان‌طور که قبلاً گفته شد، ترک موجب جهش در میدان جابه‌جایی می‌شود و در صورتی که بدون در نظر گرفتن این ناپیوستگی میدان کرنش استخراج شود، مقدار کرنش در طول ترک و در جهت عمود بر ترک بیشتر از نقاط دیگر می‌شود. از این طریق می‌توان مکان ترک و طول ترک را تعیین نمود.

میدان کرنش بر اساس مقادیر جابجایی ردیابی شده زیر دامنه‌ها محاسبه می‌شود. روش DIC با قابلیت اطمینان هدایت‌شده^۲ (RG-DIC) یک روش مناسب برای محاسبه دقیق جابجایی با زمان محاسبه کمتر است [۱۱]. در این روش فقط از یک نقطه به عنوان حدس اولیه استفاده می‌شود و برای ادامه تجزیه و تحلیل از نقاط همسایه با بالاترین ضریب همبستگی نرمال شده^۳ استفاده می‌شود [۱۱]. بر اساس این روش برای DIC دوبعدی یک برنامه متلب نوشته شده است که به نام "Ncorr" شناخته می‌شود. تعیین میدان کرنش نسبت به میدان جابجایی دشوارتر است زیرا کرنش از مشتق جابه‌جایی حاصل می‌شود و نسبت به نویز بسیار حساس هستند. این بدان معناست که هرگونه نویز در جابجایی خطاها را در محاسبه کرنش بزرگ‌تر می‌کند. یکی از بهترین روش‌ها در محاسبه

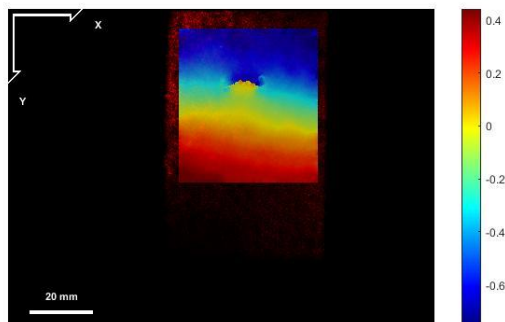
¹ Gradient descent

² Reliability-Guided DIC

³ zero-mean normalized cross correlation

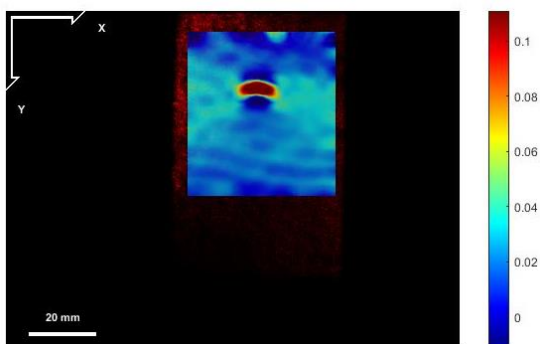
⁴ Green-Lagrangian

⁵ Smoothed



شکل ۳- میدان جابه‌جایی سطح نمونه در جهت عمود بر ترک در بار ۸ کیلوگرم

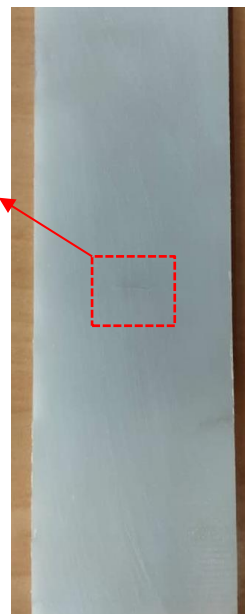
نمودار کرنش سطح نمونه در جهت عمود بر ترک در شکل ۴ نشان داده شده است و مطابق شکل ترک در کرنش عمود بر بارگذاری نمایان تر از میدان جابه‌جایی می‌باشد. لازم به ذکر است که میدان کرنش نشان داده شده کرنش واقعی نمونه نیست و در واقع نرم‌افزار با فرض پیوستگی میدان جابه‌جایی، کرنش را محاسبه می‌کند و این موضوع باعث می‌شود که مقدار کرنش در اطراف ترک بسیار زیاد شود و مکان و اندازه ترک به راحتی قابل تشخیص باشد. مقدار کرنش در اطراف ترک حدود ۳ برابر نواحی دیگر می‌باشد.



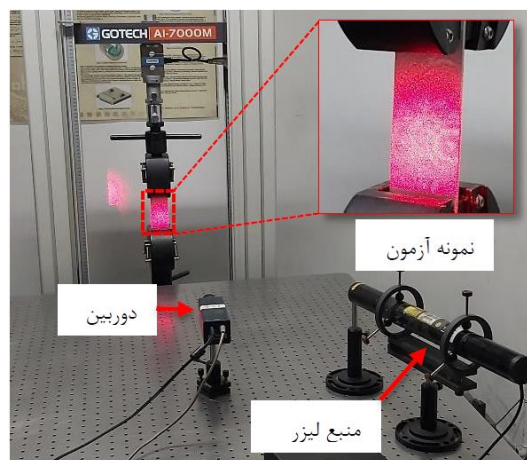
شکل ۴- میدان کرنش E_{yy} سطح نمونه در بار ۸ کیلوگرم

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج با استفاده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال با الگوی لیزری می‌توان اندازه ترک و طول ترک سطحی را اندازه‌گیری نمود. با استفاده از این روش دیگر نیازی به ایجاد الگوی مصنوعی روی سطح نیست (نسبت به DIC معمولی) و با این روش می‌توان سطوح بزرگ را بسیار سریع ارزیابی نمود و این در حالی است که ارزیابی سطوح بزرگ با روش‌های مرسوم بسیار زمان‌بر می‌باشد.



شکل ۱- تصویر نمونه ترک‌دار



شکل ۲- تصویر تجهیزات آزمون

۴- نتایج

به نمونه آزمون یک‌بار ۸ کیلوگرمی اعمال شده است (تنش ۰/۵ مگاپاسکال) و تصویر سطح نمونه با الگوی لیزری ثبت گردید اندازه هر پیکسل از سطح نمونه ۰/۰۵۸ میلی‌متر و اندازه ROI برابر ۴۵ میلی‌متر در ۵۵ میلی‌متر است و اندازه هر زیردامنه دایره‌ای به شعاع ۴۰ پیکسل است. در شکل ۳ میدان جابه‌جایی سطح نمونه در جهت y (عمود بر ترک) آمده است مطابق شکل مکان و اندازه ترک کاملاً قابل تشخیص است و مقدار جهش میدان جابه‌جایی در جهت y برابر با ۰/۵ میلی‌متر است که ۶ درصد طول ترک می‌شود.

- [4] Zheng, Q., Mashiwa, N. and Furushima, T., 2020. "Evaluation of large plastic deformation for metals by a non-contacting technique using digital image correlation with laser speckles". *Materials & Design*, 191, p.108626.
- [5] Zhang, R., Song, L., Xu, J., An, X., Sun, W., Zhao, X., Zhou, Z. and Chen, L., 2019. "Laser speckle imaging for blood flow based on pixel resolved zero-padding auto-correlation coefficient distribution". *Optics Communications*, 439, pp.38-46.
- [6] Song, J., Yang, J., Liu, F. and Lu, K., 2018. "High temperature strain measurement method by combining digital image correlation of laser speckle and improved RANSAC smoothing algorithm". *Optics and Lasers in Engineering*, 111, pp.8-18.
- [7] Song, J., Yang, J., Liu, F. and Lu, K., 2020. "Quality assessment of laser speckle patterns for digital image correlation by a multi-factor fusion index". *Optics and Lasers in Engineering*, 124, p.105822.
- [8] Anwender, M., Zagar, B.G., Weiss, B. and Weiss, H., 2000. "Noncontacting strain measurements at high temperatures by the digital laser speckle technique". *Experimental mechanics*, 40(1), pp.98-105.
- [9] Hutt, T. and Cawley, P., 2009. "Feasibility of digital image correlation for detection of cracks at fastener holes". *NDT & e International*, 42(2), pp.141-149.
- [10] Mashiwa, N., Furushima, T. and Manabe, K., 2017. "Novel non-contact evaluation of strain distribution using digital image correlation with laser speckle pattern of low carbon steel sheet". *Procedia Engineering*, 184, pp.16-21.
- [11] Pan, B., 2009. "Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement". *Applied optics*, 48(8), pp.1535-1542.
- [12] Blaber, J. Adair, B. and Antoniou, A., 2015. "Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software," *Exp. Mech.*, vol. 55, no. 6, pp. 1105–1122.
- [13] Pan, B. Asundi, A. Xie, H. and Gao, J., 2009. "Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 47, no. 7–8, pp. 865–874.
- [14] "https://www.dantecdynamics.com/", 2020.

البته در این روش نیاز است که سازه بارگذاری شود. مزیت این روش نسبت به روش‌های دیگر تحلیل میدان جابه‌جایی تجهیزات می‌باشد. روش و تجهیزات مورد استفاده برای این آزمون نسبت به روش‌های تداخل‌سنجی هالوگرافی و تداخل الگوی نمونه کم‌تر و ساده‌تر می‌باشد.

در این مقاله از یک لنز ۵۰ میلی‌متری با فاصله کانونی ثابت استفاده شده است و برای اینکه سطوح بزرگ ارزیابی گردد می‌بایست از لنزهایی با دامنه تصویر بزرگ‌تر استفاده شود. از طرف دیگر پذیرش DIC توسط صنعت منجر به توسعه محصولات جدید شده است. راه‌اندازی DIC قابل‌حمل توسط دانتک^۱ [۱۴] مؤید این موضوع است. با مجموعه DIC قابل‌حمل، بازرسی سطوح بزرگ با یک سیستم حمل‌ونقل مناسب، مانند هواپیماهای بدون سرنشین امکان‌پذیر می‌شود و ممکن در آینده بتوان با توسعه این روش، سطوح بزرگی که دسترس به آن‌ها مشکل است را بازرسی نمود.

۶- منابع

- [1] Eskandari, M., Zarei-Hanzaki, A., Yadegari, M., Soltani, N., & Asghari, A. 2014. "In situ identification of elastic-plastic strain distribution in a microalloyed transformation induced plasticity steel using digital image correlation". *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 79-87.
- [2] Pan, B., 2018. "Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals". *Measurement Science and Technology*, 29(8), p.082001.
- [3] Abshirini, M., Soltani, N. and Marashizadeh, P., 2016. "On the mode I fracture analysis of cracked Brazilian disc using a digital image correlation method". *Optics and Lasers in Engineering*, 78, pp.99-105.

¹ Dantec