

کاربرد پردازش تصویر در اندازه‌گیری جابه‌جایی، کرنش و عرض ترک اعضای بتنی در آزمایشگاه سازه

بهزاد عطاری^۱، محمدرضا توکلی‌زاده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط Email: drt@um.ac.ir

چکیده

تجهیزات مکانیکی متداول اندازه‌گیری جابه‌جایی و کرنش، مانند کرنش‌سنج‌ها و جابه‌جایی‌سنج‌های خطی (LVDT) که معمولاً به صورت تماسی به نمونه متصل می‌شوند، علیرغم داشتن دقت قابل قبول، دارای محدودیت‌هایی از قبیل، هزینه‌های بالای تجهیزات، پیچیدگی و زمان‌بر بودن نصب و همچنین عدم امکان دستیابی به کل میدان جابه‌جایی و کرنش در نمونه‌ها می‌باشند. این محدودیت‌ها باعث شده تا توجه پژوهشگران به روش‌های غیر تماسی، مانند روش‌های برپایه پردازش تصویر جلب شود. سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV) یکی از روش‌های مبنی بر پردازش تصویر است که نسبت به سایر روش‌های مبنی بر پردازش تصویر از دقت بالاتری برخوردار است. در پژوهش پیش رو، ضمن معرفی روش PIV و کاربردهای آن در زمینه آزمایش‌های مهندسی سازه، به ارزیابی دقت این روش در زمینه محاسبه میدان جابه‌جایی در ورق FRP چسبانده شده به سطح بتنی پرداخته شد. به این منظور، تعدادی نمونه ساخته شد و تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفت و منحنی بار-جابه‌جایی نمونه‌ها با استفاده از LVDT و تحلیل PIV به دست آمد و با یکدیگر مقایسه شد. بر اساس نتایج این پژوهش، روش PIV می‌تواند یک روش دقیق و کم هزینه برای اندازه‌گیری جابه‌جایی و کرنش در آزمایش‌های مهندسی سازه باشد.

کلمات کلیدی: پردازش تصویر، سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV)، جابه‌جایی، کرنش، انتشار ترک

۱. مقدمه

امروزه علیرغم استفاده گسترده از تجهیزات متداول اندازه گیری جابه جایی و کرنش، مانند جابه جایی سنج های خطی (LVDT) و کرنش سنج های مکانیکی و الکتریکی، وجود محدودیت هایی از قبیل هزینه بالا، عدم امکان استفاده در تمام شرایط محیطی، نصب تجهیزات به صورت تماسی، زمان بر بودن نصب تجهیزات و همچنین عدم امکان دست یابی به کل میدان جابه جایی و کرنش عضو مورد نظر، از جمله مشکلات پیش روی پژوهشگران می باشد [۱]. مشکلات فوق الذکر و لزوم اندازه گیری تغییر شکل ها و کرنش ها در اکثر آزمایش های مهندسی عمران، موجب شد تا پژوهشگران به دنبال روش های نوین اندازه گیری تغییر شکل باشند. در میان روش های نوین اندازه گیری تغییر شکل غیر متصل همچون اشعه ایکس و اسکن حرارتی و لیزر اسکن ویرومتری، روش های نوین بر پایه پردازش تصویر همچون روش فوتوگرامتری^۲، همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC^۳) و سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV^۴) در پژوهش های آزمایشگاهی به طور گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته است.

فوتوگرامتری دانش و فناوری استخراج اطلاعات مربوط به تغییرات مختصات هندسی اجسام، با استفاده از تصاویر گرفته شده و پردازش و تحلیل آن ها است [۲]. از جمله کاربردهای فوتوگرامتری در مهندسی عمران، اندازه گیری میدان جابه جایی و نظارت بر روند رشد ترک در اعضای بتنی مسلح در طول فرآیند آزمایش می باشد. آدرین و الماهدی در یک پژوهش، با استفاده از کنترل روند رشد ترک تیر بتنی تقویت شده با CFRP توسط فوتوگرامتری، رفتار برشی و خمشی آن را مورد بررسی قرار دادند [۳]. با وجود مزایای فوتوگرامتری، می توان به برخی از معایب این تکنیک از قبیل زمان بر بودن آماده سازی نمونه ها و نیاز به استفاده از چند دوربین و توقف بارگذاری در چند مرحله برای محاسبه کل میدان جابه جایی نمونه اشاره کرد [۳].

DIC، یکی دیگر از روش های اندازه گیری جابه جایی بر پایه پردازش تصویر است که تاکنون پژوهشگران بسیاری از این روش در زمینه های مختلف پژوهشی همچون تعیین مدول الاستیسیته بتن، در زمینه مکانیک شکست، محاسبه کرنش در بتن و همچنین برای بررسی مقاومت پیوستگی FRP به بتن، استفاده شده است [۴]. اگرچه در حال حاضر تکنیک DIC برای اندازه گیری میدان جابه جایی و میدان کرنش استفاده می شود، اما بدست آوردن میدان کرنش دقیق در بعضی موارد می تواند چالش برانگیز باشد [۴].

PIV در اصل یک روش اندازه گیری سرعت مبتنی بر پردازش تصویر است که در ابتدا در زمینه مکانیک سیالات و برای اندازه گیری سرعت جریان ۲ و ۳ بعدی سیالات به کار برده شده است [۵]. وایت و همکاران با انجام یک سری اصلاحات در این روش، گامی برای کاربرد PIV در زمینه آزمایش های ژئوتکنیک برداشتند [۶]. بر اساس نتایج پژوهش های وایت و همکاران، روش PIV اصلاح شده در مقایسه با روش های گذشته اندازه گیری جابه جایی مبتنی بر پردازش تصویر، از دقت بالاتری برخوردار بوده و توانایی پردازش محدوده وسیع تری را دارا می باشد [۶]. هدف از پژوهش پیش رو، معرفی روش PIV به عنوان یک روش نوین غیر تماسی اندازه گیری جابه جایی و کرنش در آزمایش های مهندسی عمران و بررسی عملکرد و دقت آن در آزمایش های مهندسی سازه می باشد.

۲. پردازش تصویر با استفاده از سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV)

در فرآیند PIV، ابتدا از سطح جسم در حال تغییر شکل تصاویر دیجیتال پیاپی گرفته شده و به عنوان ورودی به نرم افزار داده می شود. سپس مطابق شکل ۱ ناحیه ی مورد بررسی در نخستین تصویر به تعدادی بخش های کوچکتر به صورت یک شبکه تقسیم بندی می شود (به هر بخش کوچک وصله^۵ آزمون گفته شده و اندازه آن بر مبنای پیکسل تعیین می شود). سپس در تصویر دوم یک وصله با ابعاد بزرگ تر به عنوان دامنه ای که نرم افزار در آن جابه جایی وصله آزمون را ردیابی می کند (وصله جستجو)، انتخاب می شود. نرم افزار با کمک تابع برازش، محل وصله آزمون را در دو تصویر پیاپی ردیابی کرده و وصله ای را که دارای بیشترین مقدار تابع برازش است، به عنوان مکان جدید وصله آزمون در تصویر دوم در نظر می گیرد. به این ترتیب، فاصله افقی و عمودی بین وصله آزمون در هر دو تصویر به عنوان خروجی برنامه و به شکل یک ماتریس تعیین می گردد. با در دست داشتن ماتریس جابه جایی، میدان کرنش ناحیه مورد نظر نیز به دست می آید.

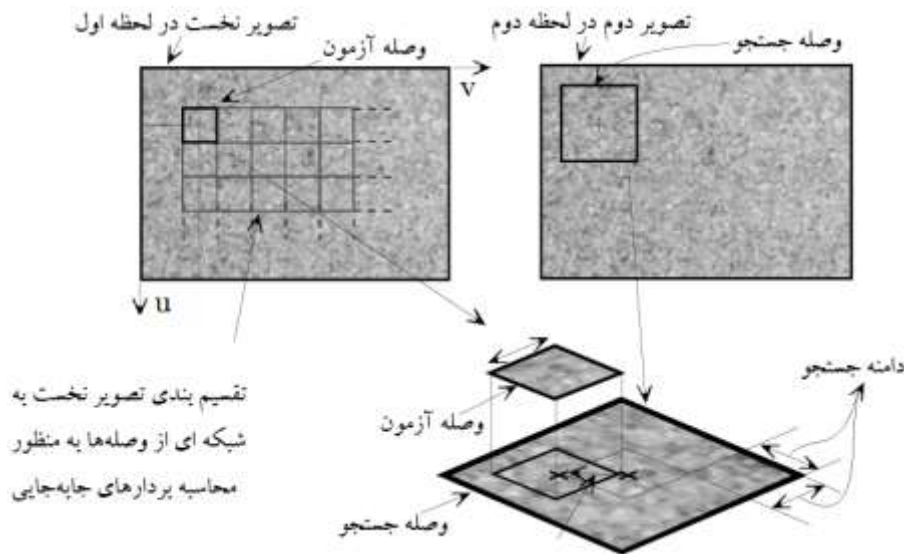
^۱ Linear Variable Differential Transformer

^۲ Photogrammetry

^۳ Digital Image Correlation

^۴ Particle Image Velocimetry

^۵ Patch



شکل ۱- شبکه بندی تصویر نخست و انتخاب ابعاد وصله‌ها

بر اساس پژوهش‌های پیشین، دقت PIV به شدت تابع اندازه وصله‌ها و بافت تصویر می‌باشد [۶]. در کاربرد PIV در آزمایش‌های مکانیک سیالات، برای فراهم کردن بافت قابل تشخیص برای پردازش تصاویر، نیازمند سید بندی شدن سیال با ذرات رنگی (توب‌های پلی‌استیرن یا پودر رنگی) است، اما در کاربرد PIV در آزمایش‌های ژئوتکنیک ماسه به‌طور طبیعی دارای بافتی با ذرات مختلف‌الرنگ است. در نتیجه، علیرغم سایر روش‌های اندازه‌گیری مبتنی بر پردازش تصویر، در روش PIV در آزمایشات ژئوتکنیکی هیچ نشانگر یا رنگ آمیزی تعبیه شده‌ای نیاز نیست.

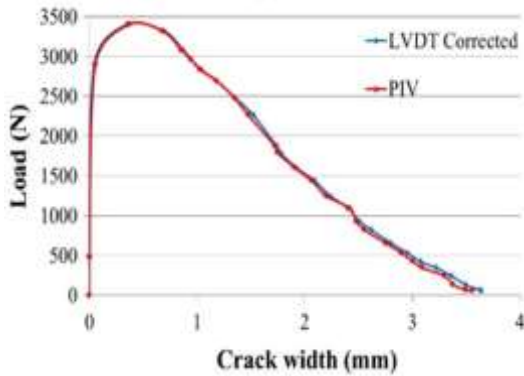
۳. کاربرد PIV در مهندسی سازه

در سال‌های اخیر، علاوه بر استفاده از PIV در آزمایش‌های مکانیک سیالات و ژئوتکنیک، پژوهشگران از این روش نوین در زمینه آزمایش‌های مهندسی سازه نیز بهره‌برده‌اند. برخی از زمینه‌های کاربرد PIV در زمینه مهندسی سازه، بررسی روند شکست در نمونه‌های بتنی و پایش ترک خوردگی در اعضای بتنی [۷]، محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش اعضای بتنی [۸] و همچنین، محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش ورق‌های FRP چسبانده شده به بین می‌باشد [۹]، که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

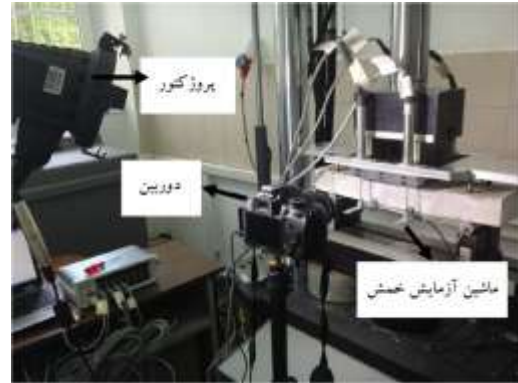
۱.۳. پایش ترک در اعضای بتنی

روش‌های تجربی متعددی برای نظارت بر ترک خوردگی در انواع بارگذاری وجود دارد، که معمول‌ترین آنها استفاده از کرنش سنجه‌های الکترونیکی و LVDT می‌باشد. استفاده از کرنش سنجه‌ها و LVDT در صورتی که با رعایت نکات توصیه شده باشد مؤثر و قابل اطمینان است، اما با این حال می‌توان به محدودیت‌هایی از قبیل: اندازه‌گیری کرنش و جابه‌جایی تنها در یک نقطه و یک مرتبه، زمان بر بودن نصب سنسورها، پیچیدگی و غیر عملی بودن اتصال سنسورهای زیاد برای نواحی وسیع، عدم پوشش کل ناحیه مورد نظر به دلیل محدودیت در نصب حسگرها به صورت نزدیک بهم و متراکم، احتمال آسیب‌دیدگی دستگاه‌های اندازه‌گیری در طول آزمایش، حذف دستگاه‌ها قبل از شکست نمونه برای جلوگیری از آسیب دیدگی تجهیزات و همچنین هزینه‌های بالای دستگاه‌های اندازه‌گیری، اشاره کرد [۷]. وجود این محدودیت‌ها، باعث شد تا محققان به دنبال روش‌های اندازه‌گیری غیر تماسی باشند.

حسینی و همکاران در یک پژوهش تجربی، توانایی و دقت PIV در نظارت بر ترک خوردگی تیر بتنی تحت خمش چهار نقطه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند [۷]. آنها در این پژوهش به منظور ارزیابی دقت روش PIV، عرض ترک‌های خمشی بوجود آمده را با استفاده از LVDT و روش PIV محاسبه کرده، و منحنی بار-عرض ترک به دست آمده از دو روش را با یکدیگر مقایسه کردند (شکل ۲).



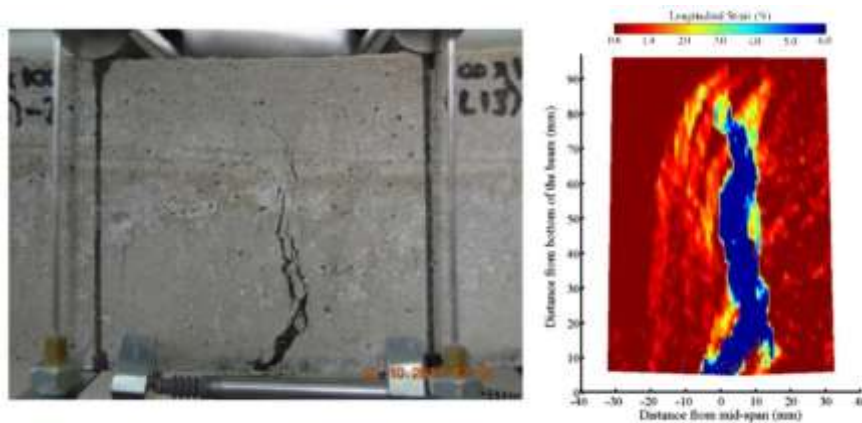
ب



الف

شکل ۲- بررسی ترک خوردگی تیر بتنی در آزمایش خمش، با استفاده از PIV. الف) موقعیت دوربین و پیروکتور. ب) مقایسه نمودار بار-عرض ترک به دست آمده از LVDT و تحلیل PIV [۷]

همچنین در این پژوهش با استفاده از تحلیل PIV، فرآیند باز شدن ترک‌ها مورد بررسی قرار گرفت و میدان کرنش ناحیه ترک خورده نمونه‌ها به دست آمد (شکل ۳).



شکل ۳- تصویر انتشار ترک در تیر بتنی و میدان کرنش متناظر با آن به دست آمده از تحلیل PIV [۷].

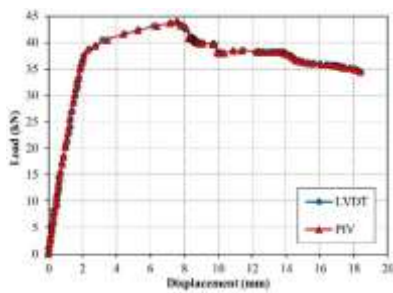
در پایان، بر اساس نتایج این پژوهش نتایج زیر حاصل شد [۷]:

- PIV یک روش قدرتمند برای اندازه‌گیری شروع و انتشار ترک‌ها است. با استفاده از نتایج تحلیل PIV، می‌تواند اطلاعات دقیقی در مورد رفتار مکانیکی مواد، مانند پروفیل‌های ترک و توزیع کرنش را به دست آورد. همچنین، با روش PIV می‌توان به میدان کرنش در لحظه حداکثر بار دست یافت و به این ترتیب، اطلاعات مهم تمام نقاط دلخواه منطقه ترک را در اختیار داشت.

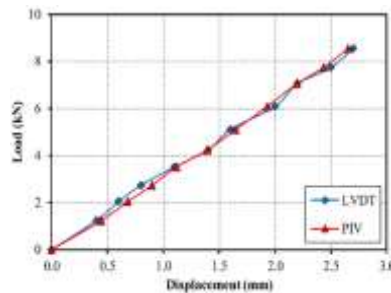
- شروع و انتشار ترک‌هایی که با چشم غیر مسلح قابل کنترل نیستند، می‌تواند به راحتی با استفاده از PIV کنترل شود. از این اطلاعات می‌توان به‌طور موثری برای تحلیل‌های مکانیکی که نیازمند دانستن اطلاعات دقیقی همچون مقدار بار در زمان ایجاد اولین ترک و تعداد ترک است، استفاده شود.
- منحنی بار-عرض ترک و همچنین میدان کرنش در تیر بتنی تحت خمش، می‌تواند با استفاده از روش غیر تماسی PIV به‌دست آید. در نتیجه، این روش می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین برای روش‌های اندازه‌گیری معمول بررسی رفتار ترک، در آزمایش‌های خمشی مورد توجه قرار گیرد.

۳.۲. اندازه‌گیری تغییر شکل و کرنش در تیرهای فولادی و بتنی

یکی دیگر از کاربردهای PIV در زمینه مهندسی سازه، اندازه‌گیری تغییر شکل و کرنش اعضای فولادی و بتنی است، که تا کنون چندین پژوهش در این زمینه انجام گرفته است. مستوفی‌نژاد و همکاران در یک پژوهش تجربی، توانایی و دقت PIV در زمینه اندازه‌گیری خیز وسط تیرهای بتنی و فولادی تحت خمش چهار نقطه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند [۸]. در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی دقت PIV در محاسبه خیز وسط دهانه تیر، مقدار خیز با استفاده از یک LVDT نیز اندازه‌گیری شد و نتایج این دو روش با یکدیگر مقایسه گردید. در شکل ۴، نمودار بار-جاب‌جایی وسط دهانه تیر بتنی و فولادی به‌دست آمده از LVDT و تحلیل PIV قابل مشاهده است. در این پژوهش، میدان کرنش ناحیه وسط دهانه تیر فولادی تحت خمش نیز محاسبه شده است، که در شکل ۵، ارایه شده است.



ج

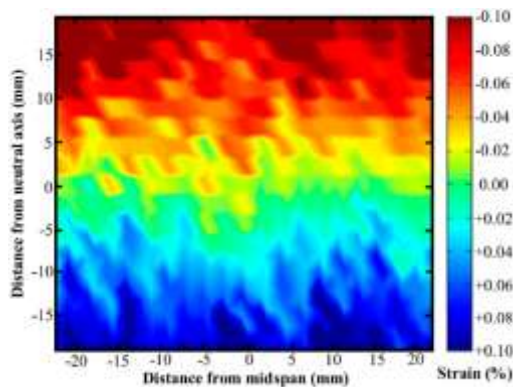


ب

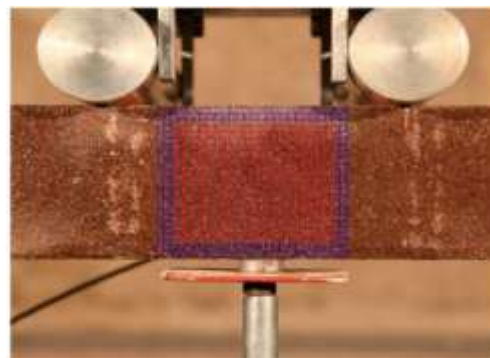


الف

شکل ۴- محاسبه و مقایسه منحنی بار-جاب‌جایی وسط دهانه تیر فولادی و بتنی تحت خمش به‌دست آمده از LVDT و تحلیل PIV. الف) تصویر آزمایش خمش و موقعیت تجهیزات. ب) منحنی بار-جاب‌جایی تیر فولادی. ج) منحنی بار-جاب‌جایی تیر بتنی [۸].



ب



الف

شکل ۵- میدان کرنش وسط دهانه تیر فولادی تحت خمش. الف) شبکه بندی ناحیه مورد نظر به وصله‌ها. ب) میدان کرنش ناحیه مورد نظر [۸].

نتایج به دست آمده از این پژوهش در رابطه با درستی نتایج تحلیل PIV این پژوهش، نتیجه گیری‌های زیر انجام گرفت [۸]:

- مقدار جابه‌جایی به دست آمده از روش PIV دقیقاً با نتایج LVDT مطابقت دارد. از این رو، می‌توان به راحتی با استفاده از روش PIV، منحنی بار-جابه‌جایی تیرهای فولادی و بتن مسلح تحت بارگذاری خمشی را ترسیم کرد.
- کل میدان جابه‌جایی برای نمونه‌های فولادی و بتن مسلح می‌تواند با استفاده از روش PIV به دست آید. با داشتن میدان جابه‌جایی، تانسور کرنش نیز می‌تواند با یک فرآیند ساده محاسبه شود.
- از آنجا که بتن یک ماده بسیار ناهمگن است، با استفاده از ابزارهای مکانیکی معمول نمی‌توان کرنش‌های دقیق را در حالت ناحیه فرآوری شکست (FPZ) پیش‌بینی یا اندازه‌گیری کرد. با این حال، این ویژگی‌ها به راحتی با استفاده از تکنیک PIV به دست می‌آیند.
- تکنیک PIV می‌تواند به دلیل هزینه‌های پایین و توانایی و دقت بالا در ارزیابی میدان جابه‌جایی و کرنش، به طور گسترده‌ای به عنوان جایگزین روش‌های اندازه‌گیری معمول، به ویژه در آزمایش‌های خمشی، استفاده شود.

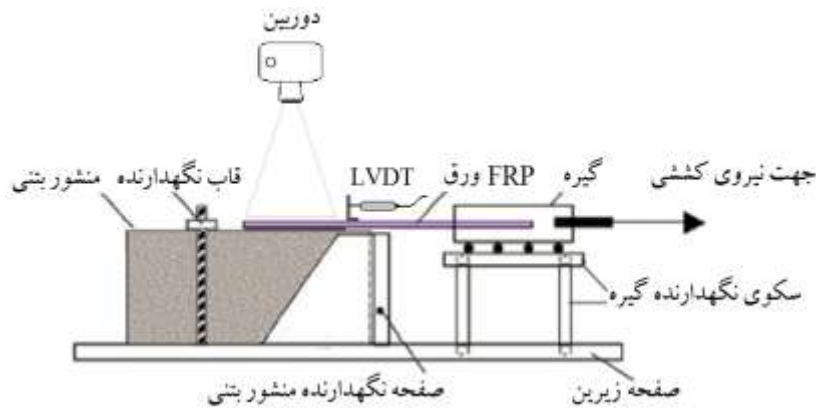
۳.۳. محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش ورق FRP

تا کنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش ورق‌های FRP چسبانده شده به بتن صورت گرفته است. حسینی و همکاران، به منظور ارزیابی طول موثر پیوستگی ورق FRP و بتن در آزمایش برش مستقیم، از روش PIV برای محاسبه میدان کرنش ورق FRP استفاده کردند [۱۰]. همچنین در پژوهشی دیگر عطاری و توکلی‌زاده از روش PIV برای ارزیابی طول موثر ورق FRP و بتن تقویت شده به روش کاشت الیاف، استفاده کردند [۹].

در ادامه نتایج آزمایشگاهی مربوط به این پژوهش در زمینه ارزیابی دقت روش PIV در محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش ورق FRP چسبانده شده به بتن ارایه می‌شود.

۳.۳.۱. مشخصات نمونه‌ها و روش انجام آزمایش

در این پژوهش، به منظور ارزیابی دقت روش PIV در محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش ورق FRP متصل شده به بتن به روش نصب خارجی EBR، تعداد شش نمونه مشهور بتنی در ابعاد $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ برای آزمایش برش مستقیم ساخته شد. برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا سطح بتن نمونه‌ها آماده‌سازی سطحی شد و بعد از تمیز کردن سطح بتن توسط جریان هوا، یک لایه پارچه کربنی تک‌جهته با عرض 50 mm و طول 150 mm به روش نصب تر و با استفاده از رزین اپوکسی دو جزئی بر روی سطح بتن قرار داده شد. همچنین به منظور انجام آزمایش برش مستقیم، دستگاهی مطابق شکل ۶ ساخته شد. همان‌طور که در نیمرخ ترسیم شده دستگاه در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود، پس از قرارگیری نمونه‌ها در قاب نگهدارنده دستگاه، یک جک هیدرولیکی با ظرفیت 300 kN به وسیله گیره مخصوص نیروی کششی را بصورت یکنواخت و با نرخ بارگذاری ثابت تا لحظه شکست به ورق FRP وارد می‌کند. مطابق شکل ۶-الف در حین بارگذاری، با استفاده از یک دوربین Canon-EOS-1300D با تفکیک پذیری $1/80$ مگاپیکسل (5184×3456 پیکسل) و مجهز به لنز Canon 18-55، از سطح بالای نمونه‌ها تصویربرداری دیجیتالی انجام شد و به منظور حذف بازتاب نورهای نامناسب، از دو منبع نور مشابه با زاویه 94.5° در دو طرف نمونه استفاده شد. همچنین به منظور ارزیابی دقت روش PIV در اندازه‌گیری جابه‌جایی ورق FRP، از یک LVDT با دامنه جابه‌جایی 5 mm در ابتدای ناحیه چسبانده شده ورق FRP به بتن استفاده شد (شکل ۶-الف).



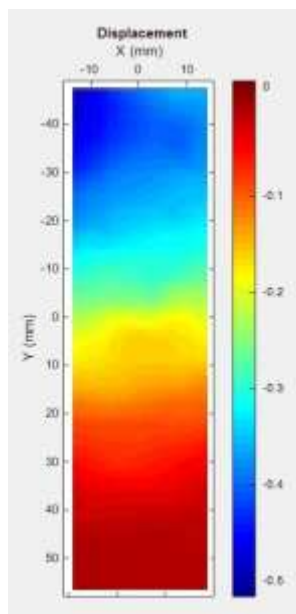
ب

الف

شکل ۶- دستگاه برش مستقیم ساخته شده در آزمایشگاه دینامیک سازه دانشگاه فردوسی مشهد. الف) تصویر دستگاه. ب) نیم رخ دستگاه.

۲.۳.۳. میدان جابه‌جایی

در این پژوهش، از آنجایی که ورق CFRP دارای بافت مناسب قابل تشخیص برای نرم افزار نمی‌باشد، مطابق شکل ۷-الف، برای ایجاد بافت مناسب پس از چسباندن ورق FRP بر روی سطح بتن و قبل از گیرش رزین اپوکسی، روی سطح نمونه‌ها با استفاده از ترکیب چند نوع ماسه با رنگ‌های مختلف به‌طور کامل پوشانده شد. وصله‌های مورد استفاده نیز در ابعاد 128×128 پیکسل و به فاصله ۳۲ پیکسل از همدیگر (مرکز به مرکز) انتخاب شدند. همچنین پردازش تصاویر با استفاده از برنامه geoPIV_RG توسعه یافته در دانشگاه کمبریج [۶] و در فضای نرم افزار MATLAB صورت گرفت. در شکل ۷-ب، میدان جابه‌جایی ناحیه متصل شده FRP به بتن به دست آمده از تحلیل PIV ارایه شده است.



ب



الف

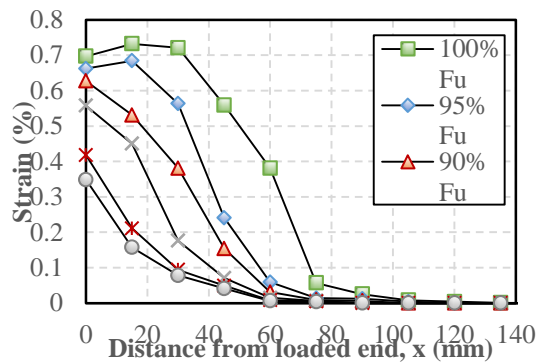
شکل ۷- محاسبه میدان جابه‌جایی با استفاده از تحلیل PIV. الف) تصویر نمونه و ناحیه تحلیل شده با PIV. ب) میدان جابه‌جایی نمونه B-1.

بر اساس نتایج به دست آمده از میدان جابه‌جایی نمونه‌ها، بیشترین اختلاف جابه‌جایی (در محل اتصال LVDT به ورق FRP) بین دو مقدار به دست آمده از LVDT و تحلیل PIV، بسیار ناچیز و در حدود ۵٪ بود. لازم به ذکر است، برای محاسبه جابه‌جایی در روش PIV، میانگین جابه‌جایی پنج نقطه‌ی واقع در عرض ورق FRP و با ۸ mm فاصله تا LVDT (بخاطر فضای گرفته شده توسط پایه LVDT) اندازه‌گیری شد.

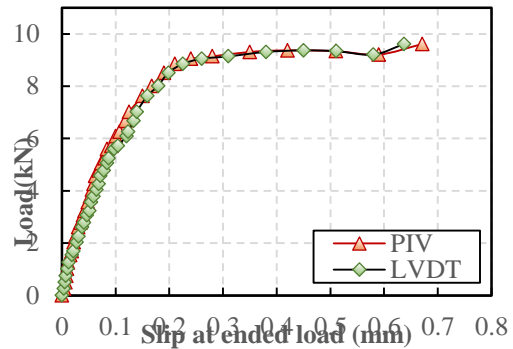
۳.۳.۳. منحنی بار-جابه‌جایی و نیمرخ کرنش طولی

در شکل ۸-الف، منحنی بار-جابه‌جایی به دست آمده از نتایج تحلیل PIV و LVDT ارایه شده است. برای ترسیم این نمودار، مقدار جابه‌جایی نقطه‌ای واقع بر روی ورق FRP و در ابتدای ناحیه متصل شده به بتن و در سمت بارگذاری شده اندازه‌گیری شد. با مقایسه منحنی‌های به دست آمده از LVDT و تحلیل PIV، می‌توان هم‌پوشانی خوبی را بین نتایج این دو روش مشاهده کرد. به طوری که متوسط اختلاف بین اندازه‌های به دست آمده از LVDT و تحلیل PIV برابر ۰/۰۱۱ mm بود.

یکی از توانایی‌های PIV، به دست آوردن میدان کرنش با استفاده از میدان جابه‌جایی است. در شکل ۸-ب، نیمرخ کرنش طولی ورق FRP با استفاده از نتایج تحلیل PIV برای سطوح بار مختلف ترسیم شده است. با بررسی نیمرخ کرنش طولی نمونه‌ها می‌توان مشاهده کرد، نیروی وارده به ورق FRP، در طولی در حدود ۸۵ mm و از ورق FRP به بتن انتقال می‌یابد.



ب



الف

شکل ۸- منحنی بار-جابه‌جایی و نیمرخ کرنش طولی ورق FRP، ترسیم شده با استفاده از نتایج تحلیل PIV و LVDT. (الف) منحنی بار جابه‌جایی. (ب) نیمرخ کرنش طولی.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش پیش رو، به منظور معرفی و ارزیابی روش PIV به عنوان یک روش غیر تماسی بر پایه پردازش تصویر در آزمایش‌های مهندسی سازه، برخی از پژوهش‌های صحت‌سنجی صورت گرفته در زمینه بررسی ترک خوردگی اعضای بتنی و اندازه‌گیری تغییر شکل و کرنش اعضای فولادی و بتنی با استفاده از تحلیل PIV مورد بررسی قرار گرفت و همچنین به منظور ارزیابی دقت روش PIV در زمینه محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش ورق FRP، تعدادی نمونه ساخته شد و تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته و مقدار جابه‌جایی حداکثر و منحنی بار-جابه‌جایی نمونه‌ها با استفاده از LVDT و تحلیل PIV به دست آمد و با یکدیگر مقایسه شد. بر اساس نتایج پژوهش‌های صحت‌سنجی انجام گرفته گذشته و نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان نتیجه‌گیری‌های زیر را انجام داد:

- PIV یک روش قدرتمند برای بررسی شروع و انتشار ترک‌ها می‌باشد، به طوری که ترک‌های غیر قابل مشاهده با چشم غیر مسلح، می‌توانند به راحتی با استفاده از PIV کنترل شوند. با استفاده از نتایج تحلیل PIV، می‌توان اطلاعات دقیقی در مورد رفتار مکانیکی مواد، مانند پروفیل‌های ترک، منحنی‌های بار-عرض ترک و میدان کرنش در لحظه حداکثر بار دست یافت. در نتیجه، این روش می‌تواند به عنوان یک جایگزین برای روش‌های اندازه‌گیری معمول در زمینه بررسی رفتار ترک، در آزمایش‌های خمشی مورد توجه قرار گیرد.

- با استفاده از روش PIV، میدان جابه‌جایی و منحنی بار-جابه‌جایی تیرهای فولادی و بتن مسلح تحت بارگذاری خمشی با دقت بسیار بالا به‌دست می‌آید. همچنین با داشتن میدان جابه‌جایی، تانسور کرنش نیز می‌تواند با یک فرآیند ساده با دقت بسیار بالا محاسبه شود. در نتیجه، روش PIV می‌تواند به‌دلیل هزینه‌های پایین و توانایی و دقت بالا در ارزیابی میدان جابه‌جایی و کرنش، به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان جایگزین روش‌های اندازه‌گیری معمول، در آزمایش‌های خمشی، استفاده شود.
- حداکثر اختلاف، بین مقادیر جابه‌جایی حداکثر ورق FRP به‌دست آمده از LVDT و تحلیل PIV در آزمایش برش مستقیم در حدود ۵٪ بود، همچنین مقدار متوسط اختلاف بین منحنی بار-جابه‌جایی ورق FRP به‌دست آمده از این دو روش، در حدود ۰/۱۱ mm بود. در نتیجه روش PIV یک روش دقیق برای محاسبه میدان جابه‌جایی ورق FRP متصل شده به بتن است. با داشتن میدان جابه‌جایی ورق FRP، می‌توان میدان کرنش و پروفیل‌های کرنش ورق FRP را نیز به‌دست آورد. بنابراین، از روش PIV می‌توان به‌عنوان یک روش کم هزینه و دقیق برای آزمایش‌های ارزیابی پیوستگی ورق FRP به بتن و به‌طور کلی، بررسی رفتار اعضای بتنی مقاوم‌سازی شده با FRP استفاده کرد.

مرجع‌ها

- [1] Wang, B., Teng, J. G., De Lorenzis, L., Zhou L., Ou J., Jin W. (2009). "Strain monitoring of RC members strengthened with smart NSM FRP bars". Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 1698-1711.
- [2] Slominski, C., Niedostatkiewicz M., and Tejchman J. (2007). "Application of particle image velocimetry (PIV) for deformation measurement during granular silo flow". Powder Technology, vol. 173, pp. 1-18.
- [3] Adrian K. Y., and Al-Mahaidi R. (2006). "Experimental investigation on torsional behavior of solid and box-section RC beams strengthened with CFRP using photogrammetry". Journal of Composites for Construction, ASCE, vol. 10, no. 4, pp. 321-329.
- [4] Czaderki C., Soudki K., and Motavalli M. (2010). "Front and side view image correlation measurements on FRP to concrete pull-off bond tests". Journal of Composites for Construction, ASCE, vol. 14, no. 4, pp. 451-463.
- [5] Czaderski C., Soudki K., and Motavalli M. (2010). "Front and side view image correlation measurements on FRP to concrete pull-off bond tests". Journal of Composites for Construction, vol. 14, pp. 451-463.
- [6] White D., Take W., and Bolton M. (2003). "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry". Geotechnique, vol. 53, pp. 619-631.
- [7] Sanal I., Ozyurt N., Hosseini A. (2016). "Characterization of hardened state behavior of self compacting fiber-reinforced cementitious composites (SC-FRCC's) with different beam sizes and fiber types". Journal of Composites Part B. 105. 30-45.
- [8] Hosseini A., Mostofinejad D., and Hajjalilue-Bonab M. (2004). "Displacement and strain field measurement in steel and RC beams using particle image velocimetry". Journal of Engineering Mechanics, vol. 140, p. 04014086.
- [9] عطاری ب. و توکلی‌زاده م. (۱۳۹۷). "ارزیابی طول موثر پیوستگی روش کاشت الیاف در نصب خارجی به روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر.
- [10] Hosseini A., and Mostofinejad D. (2014). "Effective bond length of FRP-to-concrete adhesively-bonded joints- Experimental evaluation of existing models". International Journal of Adhesion & Adhesives, 48. 150-158.