

# بررسی نرم‌افزار متن‌باز PIVlab برای سرعت‌سنجی از روی تصویر دیجیتال ذرات

محمد رضا صوفیوند<sup>۱</sup>، محمد حججی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد، ایران

<sup>۲</sup> گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد، ایران

\*مسئول مکاتبات: Hojaji\_m@pmc.iaun.ac.ir

## واژگان کلیدی

سرعت‌سنجی تصویر ذرات  
دینامیک سیالات  
آنالیز جریان  
همبستگی مستقیم  
انتقال فوریه گسسته

## تاریخچه مقاله

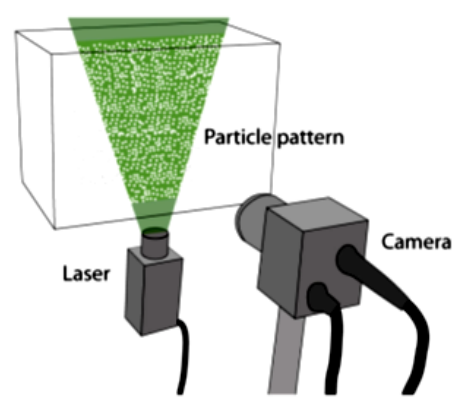
تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۲/۱۰  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۱۱

## چکیده

سرعت‌سنجی تصویر ذرات دیجیتال، یک تکنیک آنالیز غیرنفوذی بسیار مطلوب است که برای بررسی میدان جریان به صورت کمی استفاده می‌شود. به طور معمول، یک آنالیز DPIV شامل ۳ مرحله پیش‌پردازش تصویر، ارزیابی تصویر و پس‌پردازش است. هدف پیش‌پردازش، افزایش کیفیت تصاویر قبل از اعمال همبستگی بر روی تصویر است. قابل ذکر است که حساس‌ترین قسمت آنالیز DPIV، الگوریتم همبستگی بوده که در مرحله ارزیابی تصویر اعمال می‌شود. همچنین انجام پس‌پردازش بر روی داده‌های حاصل از آنالیز DPIV، به منظور دستیابی به نتایج قابل اعتماد، الزامی است. به منظور دستیابی به نتایج دقیق در میدان‌های جریان پیچیده، چالش‌ها و مشکلاتی وجود دارند که باید حل شوند در واقع کیفیت اندازه‌گیری جریان به جزئیات محاسباتی از قبیل شرایط ابتدایی تصویر (پیش‌پردازش)، برآوردگر اوج زیر پیکسل، تکنیک اعتبارسنجی داده‌ها، الگوریتم درونیابی و روش‌های هموارسازی بستگی دارد. در این تحقیق دقت چندین الگوریتم بررسی شده است. همچنین، تکنیک‌های موجود در رابط کاربری گرافیکی کاربرپسند PIVlab که ابزاری بر اساس کدی متن‌باز تحت نرم‌افزار متلب به منظور انجام آنالیزها در تکنیک سرعت‌سنجی تصویر ذرات دیجیتال است، تشریح شده است.

## ۱ مقدمه

را ارائه می‌کند [۸].

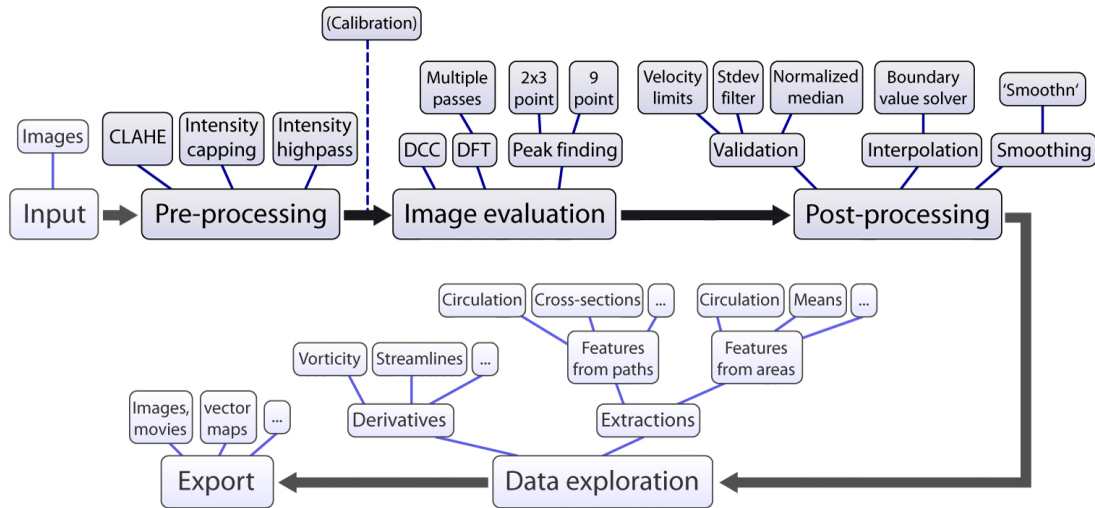


**شکل ۱:** ساختار DPIV: یک صفحه لیزر ذرات درون سیال را روشن می‌کند. یک دوربین سرعت بالا الگوی جابه‌جایی ذرات را ثبت می‌کند.

PIVlab در متلب کدنویسی شده است و برای اجرا به جعبه‌ابزار پردازش تصویر نیاز دارد. فایل اصلی PIVlab\_GUI.m است که این فایل تمام قسمت‌های مرتبط با برنامه رابط کاربری گرافیکی و مهم‌ترین توابعی که از رابط کاربری گرافیکی قابل دسترس هستند (پیش‌پردازش 'piv\_FFTmulti.m' و همبستگی 'PIVlab\_preproc.m' و همچنین، مهم‌ترین توابع برای اجرای یک آنالیز PIV از خط فرمان ('PIVlab\_commandline.m') قابل دسترسی هستند.

سرعت‌سنجی تصویر ذرات دیجیتال یک تکنیک غیرنفوذی متداول برای مشاهده کیفی و اندازه‌گیری کمی میدان جریان است. تاکنون تحقیقات بسیاری در خصوص به‌کارگیری و بهینه‌سازی تکنیک DPIV انجام شده است [۸-۱]. تحقیق حاضر به بررسی نرم‌افزار متن‌باز PIVlab می‌پردازد که کدی تحت نرم‌افزار متلب و مبنی بر رابط کاربری گرافیکی به منظور انجام آنالیزهای DPIV است. این کد از چندین ویژگی نرم‌افزار متلب استفاده می‌کند و متعاقب آن، پردازش داده‌ها را به واسطه فراهم کردن یک لینک نزدیک به رابط کاربری متلب آسان می‌کند. در DPIV، حرکت سیال به وسیله یک صفحه نازک روشن از سیال نشان داده می‌شود که این صفحه روشن حاوی ذرات ردیاب شناور خنثی و انعکاسی است. در این تکنیک یک سنسور تصویربرداری دیجیتال (CCD یا CMOS) موازی با صفحه روشن سیال قرار داده می‌شود و حرکت ذرات را ثبت می‌کند (شکل ۱).

در اغلب آنالیزهای DPIV، دو تصویر ( $A$  و  $B$ ) در زمان‌های  $t$  و  $t + \Delta t$  از صفحه روشن گرفته می‌شود. سرعت در صفحه روشن، با استفاده از زمان  $\Delta t$  و مسافتی که ذرات از تصویر  $A$  تا تصویر  $B$  طی کرده‌اند (جابه‌جایی ذرات)، به دست می‌آید. در DPIV، جابه‌جایی ذرات برای گروه‌های ذرات و از طریق ارزیابی همبستگی بسیاری از تصاویر فرعی کوچک (پنجره‌های پویش) محاسبه می‌شود. همبستگی، محتمل‌ترین جایگزین برای گروهی از ذرات منتقل شده روی یک خط مستقیم بین تصویر  $A$  و تصویر  $B$



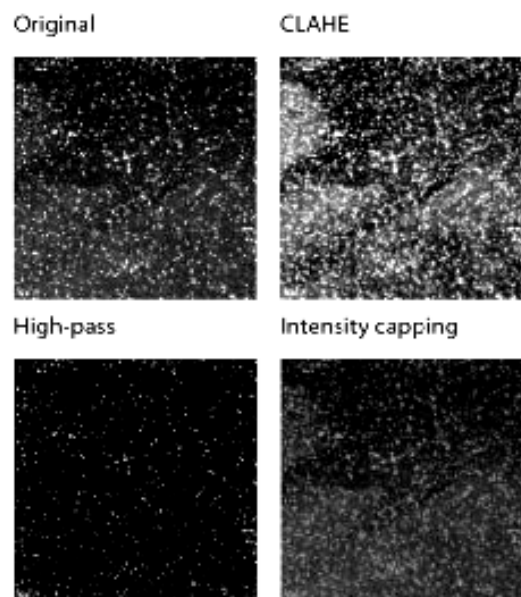
شکل ۲: آنالیزهای DPIV در PIVlab. دید کلی روند کار و ویژگی‌های به‌کار گرفته شده که در قسمت‌های بعد ارائه می‌شود.

- **برابرسازی هیستوگرام:** برابرسازی هیستوگرام انطباقی محدود شده مقابل (CLAHE) به‌منظور افزایش خوانایی داده‌های تصویر در عکس‌برداری‌های پزشکی توسعه یافته است [۱۰].  
CLAHE روی نواحی کوچک تصویر اجرا می‌شود و در هر ناحیه، بیشترین شدت هیستوگرام تصویر را به کل محدوده داده‌ها (از ۰ تا ۲۵۵ در تصاویر ۸ بیتی) گسترش می‌دهد. در نتیجه، نواحی کم‌نور (که در هنگام تصویربرداری در معرض نور کمی قرار داشته‌اند) و نواحی پرنور (که در هنگام تصویربرداری در معرض نور زیادی قرار داشته‌اند) به‌طور مستقل بهینه می‌شوند. با استفاده از این تکنیک، احتمال تشخیص بردارهای معتبر در تصاویر آزمایشی تا حدود ۳/۲٪ +۴/۷ و -۴/۷٪ بهبود یافته است [۹].
- **شدت بالاگذر:** روشنایی غیریکنواخت، موجب می‌شود که فرکانس اطلاعات زمینه پایین باشد. می‌توان با اعمال یک فیلتر بالاگذر که اطلاعات فرکانس بالای روشنایی ذرات را حفظ می‌کند، زمینه را حذف کرد [۱۱]. فیلتر به اطلاعات ذره در تصویر اهمیت می‌دهد و همه اطلاعات فرکانس پائین در تصویر را حذف می‌کند.
- **شدت پوشش:** در تکنیک DPIV فرض می‌شود که همه ذرات موجود در هر پنجره مورد بررسی، حرکت مشابهی دارند. در واقعیت چنین نخواهد بود و حتی در جریان کاملاً یکنواخت، به‌ندرت چنین چیزی اتفاق می‌افتد. ذرات روشن یا نقطه‌های روشن موجود در هر ناحیه، به‌طور آماری برای سیگنال همبستگی شرکت خواهند کرد، در نتیجه می‌توانند نتایج در جریان‌های غیریکنواخت را تحت تأثیر قرار دهند [۹]. فیلتر شدت پوشش، این مسئله را دور می‌زند. در این تکنیک، یک حد بالا از شدت خاکستری انتخاب شده و همه پیکسل‌هایی که از آن آستانه تجاوز کرده‌اند با این حد بالا جایگزین می‌شوند؛ بنابراین، برخلاف CLAHE، فقط مقدار اندکی از شدت اطلاعات پیکسل‌ها تنظیم می‌شود که اثر منفی پتانسیل تغییرات تصویر را محدود می‌کند. شدت پوشش، احتمال تشخیص بردارهای معتبر در تصاویر تجربی

به‌طور معمول، یک آنالیز DPIV شامل ۳ مرحله پیش‌پردازش تصویر، ارزیابی تصویر و پس‌پردازش است (شکل ۲). همه این مراحل از رابط کاربری گرافیکی PIVlab در دسترس هستند. روند کار، مبتنی بر فهرست است. فهرست در سمت چپ با گزینه ورود تصویر و گزینه‌های پیش‌پردازش شروع می‌شود و در سمت راست با ارزیابی تصویر/آنالیز PIV، پس‌پردازش و اعتبارسنجی داده‌ها ادامه می‌یابد. در ادامه به ویژگی‌ها و تکنیک‌های PIVlab پرداخته خواهد شد.

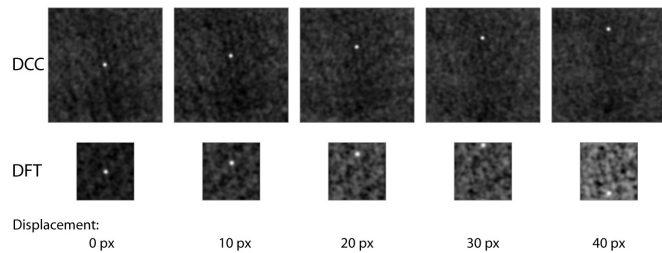
## ۲ پیش‌پردازش تصویر

یک روش متداول به‌منظور بهبود اندازه‌گیری تکنیک PIV، افزایش کیفیت تصاویر قبل از اعمال همبستگی بر روی تصویر است [۸، ۹]. در ادامه، تعدادی از تکنیک‌های پیش‌پردازش که در PIVlab به‌کار گرفته شده‌اند، معرفی شده است (شکل ۳).



شکل ۳: اثر تکنیک‌های پیش‌پردازش مختلف.

اندازه متفاوت داشته باشند [۱۴]. هنگامی که اندازه  $B$  دو برابر اندازه  $A$  انتخاب شود و جابه‌جایی ذرات بیش از نصف اندازه  $A$  نباشد، در نتیجه تحلیل‌ها اطلاعاتی از بین نمی‌رود و یک ماتریس همبستگی معتبر با نویز زمینه کم مهیا می‌شود (شکل‌های ۴ و ۵). بررسی‌ها نشان داده است که نتایج حاصل از تحلیل به روش DCC، دقیق‌تر از روش DFT استاندارد است [۱۲]؛ اما قابل‌ذکر است که روش DCC نسبت به روش DFT استاندارد، هزینه محاسباتی بالاتری به‌خصوص در نواحی مورد بررسی بزرگ دارد [۸، ۱۲، ۱۵].



**شکل ۵:** ماتریس‌های همبستگی روش DCC (بالا) و روش DFT (پایین)، نواحی بررسی  $A$  برای هر دو روش DCC و DFT 64.64 پیکسل است. ناحیه  $B$  در DCC 128.128 و در DFT 64.64 پیکسل است. در روش DCC، نویز پیش‌زمینه تا جابه‌جایی ۳۲ پیکسل افزایش نمی‌یابد. در روش DFT، اگر جابه‌جایی بیشتر از صفر پیکسل باشد، نویز پیش‌زمینه فوراً افزایش می‌یابد. یک جابه‌جایی بیشتر از ۳۲ پیکسل، اوج همبستگی را به سمت مخالف ماتریس همبستگی جهت‌دار می‌کند و از این‌رو اندازه‌گیری درست را غیرممکن می‌کند.

### ۲.۳ DFT و تکنیک‌های DFT پیشرفته

نقطه ضعف بالقوه DCC - هزینه محاسبات - می‌تواند با محاسبه ماتریس همبستگی در حوزه فرکانس و با استفاده از FFT (شکل ۶-A) رفع شود [۸]. در این روش از نواحی مورد بررسی با اندازه مشابه استفاده می‌شود. از این‌رو جابه‌جایی هر ذره بیانگر بخشی از اتلاف اطلاعات است که می‌تواند به‌واسطه افزایش مقدار نویز زمینه در ماتریس همبستگی مورد توجه قرار گیرد (شکل ۵، پایین).

نویز زمینه، تشخیص شدت اوج را پیچیده می‌کند و دقت را کاهش می‌دهد. از این‌رو، توصیه می‌شود که جابه‌جایی به حدود ۲۵٪ منطقه مورد بررسی کاهش یابد تا نویز زمینه در ماتریس همبستگی پائین بماند [۱]. این معایب را می‌توان از طریق اجرا کردن چندین گذر DFT بر روی مجموعه داده‌های مشابه، جبران کرد [۱۷]. نتیجه صحیح حاصل از آنالیز اولین گذر، برای جبران ناحیه مورد بررسی در گذرهای بعدی به‌کار برده می‌شود. به این طریق، از دست رفتن اطلاعات ناشی از جابه‌جایی ذرات، به حداقل می‌رسد. شبکه مورد بررسی می‌تواند با هر گذر اصلاح شود و دقت سه بعدی (فضایی) بالایی را در نقشه بردار پایانی همراه با یک گستره سرعت دینامیکی بالا و یک نسبت سیگنال به نویز بهینه نتیجه دهد [۱۸].

در جریان‌های واقعی، الگوهای ذرات علاوه بر این‌که تحت برش هستند، چرخانده نیز می‌شوند. حرکت غیریکنواخت ذرات، شدت اوج در ماتریس همبستگی را توسعه داده و نتایج را خراب و نامطلوب می‌کند. چندین روش برای حساب کردن انتقال مناطق مورد بررسی پیشنهاد شده است [۱۹-۲۱]. فرآیندی که بدین منظور در PIVlab به‌کار گرفته شده، به این شرح است

را تا حد  $+۵/۲$  و  $-۵/۲$  بهبود می‌بخشد [۹].

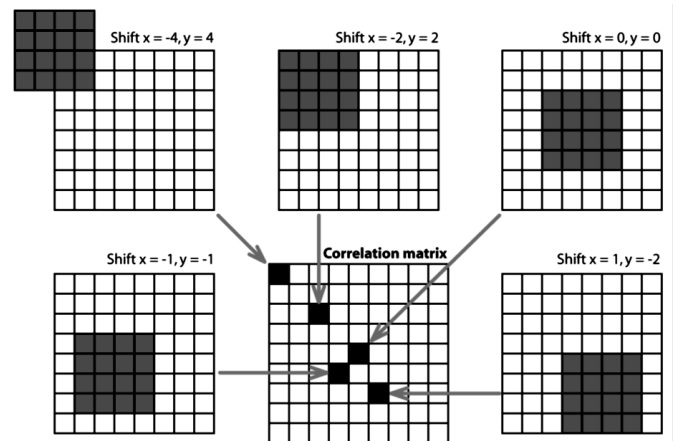
### ۳ ارزیابی تصویر

حساس‌ترین قسمت آنالیز DPIV، الگوریتم همبستگی است. به‌منظور آن‌که بیشترین امکان جایگزینی در نواحی مورد بررسی نتیجه شود، همبستگی بر تصاویر فرعی کوچک (پنجره‌های پویس) از یک جفت تصویر اعمال می‌شود. در واقع، همبستگی یک تکنیک مطابقت الگوی آماری است که سعی می‌کند الگوی ذرات از ناحیه مورد بررسی  $A$  را در ناحیه مورد بررسی  $B$  بیابد. این تکنیک آماری با گسسته‌سازی تابع همبستگی اجرا می‌شود (رابطه (۱)) [۱۲].

$$C(m, n) = \sum_i \sum_j A(i, j) B(i - m, j - n), \quad (1)$$

که در رابطه فوق،  $A$  و  $B$  نواحی مورد بررسی مربوط به تصاویر  $A$  و  $B$  هستند. موقعیت شدت اوج در ماتریس همبستگی حاصله  $C$ ، بیشترین احتمال جابه‌جایی ذرات از  $A$  به  $B$  را نتیجه می‌دهد [۱۲].

به‌طور معمول، دو روش برای حل معادله (۱) وجود دارد: آسان‌ترین روش، محاسبه ماتریس همبستگی در حوزه فضایی (سه بعدی) است. شکل ۴ نمایش گرافیکی این همبستگی را نشان می‌دهد. این روش با نام‌های همبستگی مستقیم [۱۳]، مطابقت الگوی تصویر ذرات [۱۲] یا فیلترینگ حلقه [۱۴] خوانده می‌شود. روش دیگر برای محاسبه ماتریس همبستگی، در حوزه فرکانس و با بهره‌گیری از انتقال فوریه گسسته است. DFT با استفاده از یک انتقال فوریه سریع محاسبه می‌شود [۱۵]. هر دو روش در PIVlab به‌کار گرفته شده‌اند. قابل‌ذکر است که هر دو روش به نوبه خود دارای مزایا و معایبی هستند که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است. جزئیات بیشتر در مورد زمینه ریاضیاتی همبستگی را می‌توان در مقالات [۸، ۱۶] جستجو کرد.

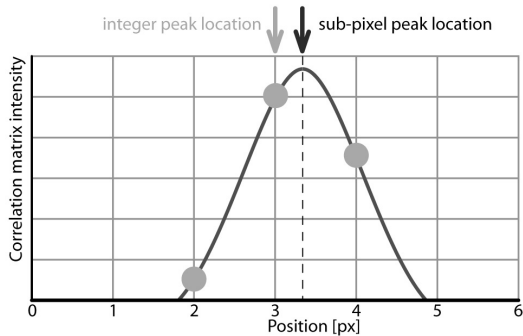


**شکل ۴:** محاسبه ماتریس همبستگی با استفاده از DCC به‌گونه‌ای که در متلب اجرا می‌شود. نواحی بررسی  $A$  (سایز ۴.۴ پیکسل) با نواحی بررسی  $B$  (اندازه ۸/۸ پیکسل) و ماتریس همبستگی (اندازه ۹/۹ پیکسل) را نتیجه می‌دهد [۸].

### ۱.۳ همبستگی مستقیم

روش همبستگی مستقیم، ماتریس همبستگی را در حوزه فضایی و سه بعدی محاسبه می‌کند. در این روش، نواحی مورد بررسی  $A$  و  $B$  می‌توانند دو

قرار گیرد و یا اگر تصاویر دارای تاری ناشی از حرکت زیاد باشند، بیشینه جابه‌جایی می‌تواند یک شکل بیضوی داشته باشد. در این مورد، یک تابع گوسین دو بعدی (برازش ۹ درجه‌ای) عملکرد بهتری دارد [۲۵]. ارزش افزوده کاربرد یک تابع گوسین دو بعدی در روش‌های بدون تغییر شکل، مثل DCC و DFT تک گذر بیشتر مشخص می‌شود. هر دو الگوریتم یافتن بیشینه، در PIVlab به‌کار گرفته شده است.



**شکل ۷:** اصل برازش ۳/۲- نقطه گوسین: دقت زیر پیکسل از طریق برازش یک تابع گوسین تک بعدی (خط کامل) به‌منظور توزیع شدت صحیح از ماتریس همبستگی (نقاط) برای هر دو محور به‌طور مستقل (در شکل تنها یک محور نشان داده شده است) به‌دست می‌آید.

## ۴ پس پردازش

### ۱.۴ اعتبار سنجی داده‌ها

به‌طور کلی، انجام پس پردازش بر روی داده‌های حاصل از آنالیز DPIV، به‌منظور دستیابی به نتایج قابل اعتماد، الزامی است [۲۶]. یک روش پایه برای فیلتر کردن داده‌های اشتباه که در PIVlab به‌کار گرفته شده، انتخاب حدود برای سرعت‌های قابل قبول به‌طور دستی است. آستانه‌های سرعت می‌تواند به‌صورت نیمه اتوماتیک توسط مقایسه هر محتوای سرعت با یک آستانه کمتر و بیشتر تعیین شوند ( $t_{lower}$  و  $t_{higher}$ ):

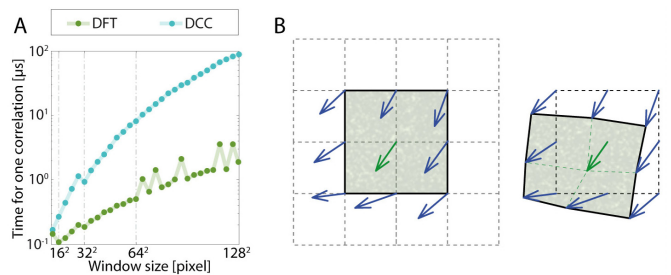
$$t_{lower} = u - n\sigma_u \quad (۲)$$

$$t_{higher} = u + n\sigma_u \quad (۳)$$

که در روابط فوق،  $u$  سرعت متوسط و  $\sigma_u$  انحراف استاندارد  $u$  است. مقدار  $n$  که توسط کاربر تعریف می‌شود، تعیین‌کننده سختی این فیلتر است. این فیلتر در عمل خیلی خوب کار می‌کند، به‌طوری‌که آن را تا حدی با طبیعت جریان سازگار می‌کند.

یک روش متداول‌تر برای تشخیص داده‌های غیرمنطقی، که به‌طور اتوماتیک به وضعیت جریان وابسته است، آزمون متوسط نرمال شده (فیلتر متوسط محلی) است [۲۷]. فیلتر، نوسانات سرعت را با در نظر گرفتن متوسط در یک همسایگی ۳×۳ اطراف یک بردار مرکزی ارزیابی می‌کند. سپس متوسط این نوسان، به‌عنوان نرمال‌ساز برای یک آزمون متوسط مطابق بهترین نمونه استفاده می‌شود.

که: تحلیل با یک آنالیز DFT معمولی آغاز می‌شود. اولین گذر، اطلاعات جابه‌جایی در مرکز هر منطقه مورد بررسی را نتیجه می‌دهد. هنگامی‌که مناطق حدود ۵۰٪ با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند، اطلاعات جابه‌جایی اضافی در مرزها و گوشه‌های هر ناحیه مورد بررسی به وجود خواهد آمد (۹ موقعیت در کل، شکل ۶-B چپ). این اطلاعات برای محاسبه اطلاعات جابه‌جایی در هر پیکسل از ناحیه مورد بررسی از طریق درون‌یابی دوخطی به‌کار برده می‌شود. سپس، ناحیه مورد بررسی  $B$ ، طبق این اطلاعات جابه‌جایی و (شکل ۶-B راست) با استفاده از درون‌یابی دوخطی (سریع‌تر) یا درون‌یابی نوار باریک (دقت بیشتر، سرعت کمتر) تغییر شکل داده می‌شود. گذر مورد بررسی بعدی، ناحیه مورد بررسی اصلی  $A$  را به ناحیه تغییر شکل یافته  $B$  مرتبط می‌کند. اطلاعات جابه‌جایی باقیمانده از هر گذر جمع‌آوری می‌شود. بعد از چند گذر، جابه‌جایی با دقت بالا تعیین می‌شود. مابین گذرها، اما نه بعد از آخرین گذر، اطلاعات سرعت هموار و اعتبار سنجی شده و اطلاعات ازدست‌رفته درون‌یابی می‌شوند. اعتبار سنجی داده‌ها نسبتاً سخت‌گیرانه انجام می‌شود، به‌طوری‌که هر اثر خرابی ناشی از درون‌یابی و هموارسازی، در همبستگی حاصل از گذرهای بعدی اصلاح خواهد شد.



**شکل ۶:** (A) سرعت محاسبه DCC در مقایسه با DFT (هر دو محاسبات در متلب انجام شده‌اند). برای محاسبات FFT، از FFTW که ورودی‌ها را در اندازه دلخواه می‌پذیرد، استفاده شده است [۲۲]، اما برای اندازه‌های اصلی یا فاکتورهای اصلی بزرگ کند است (به پیک‌های گراف توجه شود). عموماً، روش DFT بسیار سریع‌تر است. (B) اصل تکنیک تغییر شکل پنجره. چپ: بعد از اولین گذر مورد بررسی، اطلاعات جابه‌جایی در ۹ موقعیت کناری ناحیه مورد بررسی ارائه می‌شود. این اطلاعات برای مشتق گرفتن جابه‌جایی هر پیکسل از ناحیه مورد بررسی درون‌یابی می‌شود. به‌طور مکرر، ناحیه مورد بررسی  $B$  از طریق چندین گذر بررسی اضافی تغییر شکل می‌یابد.

## ۳.۳ یافتن بیشینه

انتخاب تکنیک یافتن بیشینه، مشابه با انتخاب تکنیک همبستگی، فاکتور مهم و تاثیرگذار دیگری بر دقت DPIV است. جابه‌جایی صحیح دو ناحیه مورد بررسی می‌تواند مستقیماً از موقعیت شدت بیشینه ماتریس همبستگی تعیین شود. این موقعیت می‌تواند با دقت زیر پیکسل با استفاده از گستره‌ای از روش‌ها تصحیح شود [۲۳، ۲۴، ۸]. برازش دادن یک تابع گوسین برای توزیع شدت صحیح، یک روند استاندارد است (شکل ۷). استفاده از آن تابع تنها برای پیکسل‌های افقی و عمودی مجاور به‌طور مستقیم (۲ بار، یک برازش سه درجه‌ای) کافی است و برای ارزیابی محور  $x$  و  $y$  باید به‌طور مجزا انجام شود. بیشینه تابع برازش شده برای تعیین جابه‌جایی ذرات با دقت زیر پیکسل استفاده می‌شود.

اگر جابه‌جایی ذرات در ناحیه مورد بررسی در معرض برش یا چرخش

## ۲.۴ درون‌یابی داده‌ها

پس از حذف داده‌های غیرمنطقی، بردارهای از دست رفته باید با داده‌های درون‌یابی شده جایگزین شوند [۲۶]. یک تکنیک متداول درون‌یابی همسایگی  $3/3$  (متوسط  $3/3$ ) است. درون‌یابی خطی دو بعدی یا نوار باریک گزینه‌های دیگر هستند [۵]. PIVlab از یک حل‌کننده مقدار مرزی برای درون‌یابی استفاده می‌کند. این روش یک درون‌یابی نسبتاً هموار را فراهم می‌کند و نواحی بزرگ‌تر با داده‌های از دست‌رفته بیشتر به سمت میانگین سرعت‌های مرزی تمایل خواهند داشت که این موضوع از جهش داده‌ها جلوگیری می‌کند.

## ۳.۴ هموارسازی داده‌ها

مقدار مشخصی خطا در اندازه‌گیری و آنالیزهای DPIV غیرقابل اجتناب است [۸]. نویز می‌تواند به‌طور مؤثری از طریق هموارسازی داده‌ها کاهش داده شود. رافل و همکارانش اعمال یک حلقه از داده‌ها با یک هسته  $2/2$  یا  $3/3$  و با وزن‌های برابر را پیشنهاد دادند [۸]. یک روش مؤثر و متداول دیگر برای هموار کردن داده‌های DPIV، فیلترینگ متوسط است. الگوریتم‌های هموارسازی پیشرفته‌تر بر اساس روش حداقل مربعات اضافه شده هستند. قابل ذکر است که روش دوم در PIVlab به‌کار گرفته شده است [۲۸].

## ۴.۴ شناسایی داده‌ها

بسیاری از مطالعات DPIV، نشان می‌دهد که الگوهای جریان بسیار پیچیده هستند. توصیف چنین پیچیدگی‌هایی صرفاً با نقشه‌های برداری سخت است. یکی از مزیت‌ها و ویژگی‌های مهم PIVlab آن است که تعداد زیادی پارامتر برای تفسیر نتایج ارائه می‌کند. به‌عنوان مثال مشتقات مثل رتیسیت، نرخ تنش برشی، نرخ کرنش و واگرایی می‌توانند محاسبه شوند. همچنین به‌منظور محاسبه مقادیر انتگرالی، می‌توان داده‌ها را از مسیرها یا نواحی مختلف استخراج کرد.

## ۵.۴ کنترل کیفیت

عملکرد توابع بر روی ویندوز ایکس‌پی و ۷ با نسخه‌های R2010a، R2011a و R2013a متلب آزموده شده است. اگرچه نویسندگان به سیستم‌های عملکردی بیشتر و ورژن‌های بالاتر متلب دسترسی نداشته‌اند، بسیاری از کاربران گزارش کرده‌اند که PIVlab بر روی سیستم‌عامل‌های Mac OSX و Unix/Linux بدون مشکل کار می‌کند. اشکالاتی که در تعدادی از آخرین ده نسخه PIVlab کشف شده، قبل از نسخه بعدی برطرف شده است. PIVlab، توسط بیش از ۱۵۰ دانشجو که از سیستم‌عامل‌ها و نسخه‌های متفاوت متلب استفاده کرده‌اند، بررسی و بهینه شده و در نهایت مورد تأیید قرار گرفته است. علاوه بر این، تست‌های گسترده‌ای بر روی کیفیت نتایج به‌دست آمده با PIVlab با استفاده از بیش از ۶۰۰۰۰ تصویر ذرات ساختگی انجام شده است. ویژگی‌های تصاویر ساختگی به‌گونه‌ای انتخاب شدند که بتوان تمام پارامترهای مهم PIV را با دقت محاسبه کرد [۸]. نتایج جزئی

این تست‌ها در مرجع [۲۹] آورده شده است.

جعبه‌ابزار PIVlab شامل سندی است که یک آنالیز اتوماتیک کامل برای بررسی و تجزیه و تحلیل دقت آنالیز DPIV انجام می‌دهد. سند "Accuracy.m" تصاویر PIV تصادفی را به‌منظور ارزیابی این تصاویر و انجام مقایسه بین جابه‌جایی واقعی و محاسبه شده در نواحی مورد بررسی، ایجاد می‌کند. این سند به کاربران کمک می‌کند تا اطمینان حاصل کنند که PIVlab بر روی متلب و سیستم‌عامل آن‌ها با دقت کار کرده است.

## ۶.۴ دقت آنالیز DPIV

کیفیت اندازه‌گیری و آنالیز DPIV در PIVlab به‌طور گسترده و با استفاده از تصاویر ذرات ساختگی با ویژگی‌های شناخته شده، ارزیابی شده است. اثر قطر تصویر ذرات، دانسیته ذرات، نویز حسگر، اتلاف جفت ذره، تاری در حرکت و برش مشخص و گزارش شده است [۲۹]. این تست‌های کیفیت نشان داده که روش DFT همراه با تغییر شکل پنجره، از همبستگی به روش‌های DFT و DCC اصلی، به‌خصوص تحت شرایط چالش برانگیز بهتر است. بار محاسباتی اضافی از طریق افزایش سختی و دقت الگوریتم‌ها جبران می‌شود. تحت شرایط بهینه (قطر تصویر ذرات حدود ۳ نانومتر و دانسیته ذرات حدود ۵ تا ۱۵ ذره در پنجره، بدون نویز و بدون اتلاف جفت ذره، بدون تاری حرکت و بدون برش) خطای انحراف تغییر شکل پنجره در الگوریتم‌های DPIV، کمتر از ۰/۰۰۵ پیکسل‌ها و خطای تصادفی کمتر از ۰/۰۲ پیکسل‌ها است.

## ۷.۴ عملکرد درون‌یابی

عملکرد محبوب‌ترین تکنیک‌های درون‌یابی و حل‌کننده مقادیر مرزی، آزمایش شده‌اند: تعدادی از جفت تصاویر سنتزی و واقعی با استفاده از DPIV استاندارد آنالیز شده‌اند (شکل ۸ چپ). افزایش مقدار بردارهای تصادفی (صفر تا ۱۵ درصد) از ماتریس بردار نتایج حذف شده است (شکل ۸ وسط). داده‌های از دست رفته با استفاده از یکی از درون‌یاب‌ها، درون‌یابی می‌شود (شکل ۸ راست) و در نهایت اختلاف مطلق متوسط بین داده‌های اصلی و داده‌های درون‌یابی شده، تعیین می‌شوند. کل این روند، ۱۰۰۰ بار برای هر جفت تصویر و هر سطح از داده‌های از دست رفته تکرار شده است. تحت شرایط چالش برانگیز و مقادیر زیاد داده‌های از دست رفته، حل‌کننده مقادیر مرزی که در PIVlab اجرا شده، بهترین عملکرد را دارد (شکل ۹) [۲۹].

## ۸.۴ عملکرد هموارسازی

عملکرد الگوریتم‌های هموارسازی با استفاده از داده‌های DPIV تصاویر ذرات سنتز شده، بررسی شده است [۲۹]. در هموار کردن داده‌ها مهم نیست چه الگوریتمی استفاده می‌شود، همیشه مقدار خطا تولید شده توسط الگوریتم DPIV را کاهش می‌دهد و

از این‌رو، کیفیت تخمین سرعت افزایش می‌یابد (شکل ۱۰). الگوریتم Smoothn، تفاوت بین سرعت‌های واقعی و آنالیزی را کاهش می‌دهد [۲۸]. در نتیجه، این الگوریتم در PIVlab به‌منظور افزایش هر چه بیشتر دقت

تخمین سرعت به کار گرفته شده است.

[6] Willert, Christian. The fully digital evaluation of photographic piv recordings. *Applied Scientific Research*, 56(2):79-102, Jun 1996.

[7] Grant, I. Particle image velocimetry: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 211(1):55-76, 1997.

[8] Raffel, Markus, Willert, Christian E., , Wereley, Steven, and Kompenhans, Jürgen. *Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, second ed. , 2007.

[9] Shavit, Uri, Lowe, Ryan J., and Steinbuck, Jonah V. Intensity capping: a simple method to improve cross-correlation piv results. *Experiments in Fluids*, 42(2):225-240, Feb 2007.

[10] Pizer, Stephen M., Amburn, E. Philip, Austin, John D., Cromartie, Robert, Geselowitz, Ari, Greer, Trey, ter Haar Romeny, Bart, Zimmerman, John B., and Zuiderveld, Karel. Adaptive histogram equalization and its variations. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 39(3):355 - 368, 1987.

[11] Gonzalez, Rafael C. and Wintz, Paul. *Digital image processing*. Addison Wesley, second ed. , 1987.

[12] Huang, H, Dabiri, D, and Gharib, M. On errors of digital particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 8(12):1427-1440, dec 1997.

[13] Okamoto, K, Nishio, S, Saga, T, and Kobayashi, T. Standard images for particle-image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 11(6):685-691, may 2000.

[14] Stamhuis, Eize J. Basics and principles of particle image velocimetry (piv) for mapping biogenic and biologically relevant flows. *Aquatic Ecology*, 40(4):463-479, 2006.

[15] Soria, Julio. An investigation of the near wake of a circular cylinder using a video-based digital cross-correlation particle image velocimetry technique. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 12(2):221 - 233, 1996.

[16] Keane, Richard D. and Adrian, Ronald J. Theory of cross-correlation analysis of piv images. *Applied Scientific Research*, 49(3):191-215, 1992.

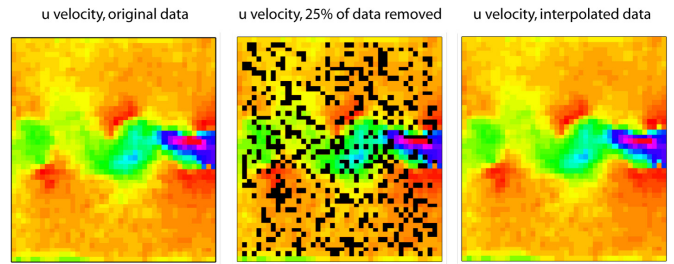
[17] Westerweel, J., Dabiri, D., and Gharib, M. The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital piv recordings. *Experiments in Fluids*, 23(1):20-28, 1997.

[18] Scarano, F. and Riethmuller, M. L. Iterative multigrid approach in piv image processing with discrete window offset. *Experiments in Fluids*, 26(6):513-523, 1999.

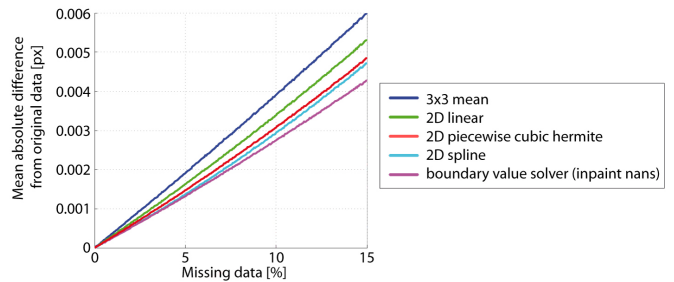
[19] Huang, H. T., Fiedler, H. E., and Wang, J. J. Limitation and improvement of piv. *Experiments in Fluids*, 15(4):263-273, 1993.

[20] Jambunathan, K., Ju, X. Y., Dobbins, B. N., and Ashforth-Frost, S. An improved cross correlation technique for particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 6(5):507-514, may 1995.

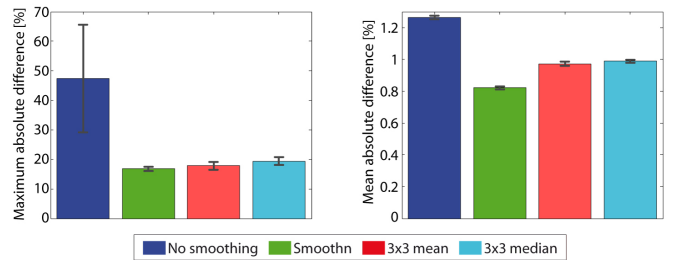
[21] Scarano, F. and Riethmuller, M. L. Advances in iterative multigrid piv image processing. *Experiments in Fluids*, 29(1):S051-S060, 2000.



**شکل ۸:** فرآیند برای تست کردن چندین تکنیک درون‌یابی. چپ: داده‌های سرعت اصلی. داده‌ها در موقعیت‌های تصادفی حذف می‌شود. راست: فواصل با درون‌یابی پر می‌شود و با داده‌های سرعت اصلی مقایسه می‌شود.



**شکل ۹:** عملکرد درون‌یابی‌های معمول. حل‌کننده مقادیر مرزی در حضور مقادیر بیشتر از ۱۰ درصد داده‌های اتلافی به بهترین صورت عمل می‌کند؛  $n = ۱۰۰۰$ .



**شکل ۱۰:** اعتبار الگوریتم‌های هموارسازی. چپ: بیشینه اختلاف بین سرعت‌های محاسبه شده و سرعت‌های واقعی در حضور سرعت حقیقی. راست: تفاوت مطلق میانگین (متوسط)  $n = ۲۵۰$ .

## مراجع

[1] Keane, R D and Adrian, R J. Optimization of particle image velocimeters. i. double pulsed systems. *Measurement Science and Technology*, 1(11):1202-1215, nov 1990.

[2] Adrian, Ronald J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1):261-304, 1991.

[3] Willert, C. E. and Gharib, M. Digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 10(4):181-193, Jan 1991.

[4] Buchhave, Preben. Particle image velocimetry—status and trends. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 5(5):586 - 604, 1992. Special Issue on Experimental Methods in Thermal and Fluid Science.

[5] Stamhuis, E and Videler, J. Quantitative flow analysis around aquatic animals using laser sheet particle image velocimetry. *Journal of Experimental Biology*, 198(2):283-294, 1995.

- [22] Frigo, M. and Johnson, S. G. The design and implementation of fftw3. *Proceedings of the IEEE*, 93(2):216–231, Feb 2005.
- [23] Lourenco, L. and Krothapalli, A. On the accuracy of velocity and vorticity measurements with piv. *Experiments in Fluids*, 18(6):421–428, Apr 1995.
- [24] Roesgen, T. Optimal subpixel interpolation in particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 35(3):252–256, Sep 2003.
- [25] Nobach, H and Honkanen, M. Two-dimensional gaussian regression for sub-pixel displacement estimation in particle image velocimetry or particle position estimation in particle tracking velocimetry, Apr 2005.
- [26] Nogueira, J, Lecuona, A, and Rodríguez, P A. Data validation, false vectors correction and derived magnitudes calculation on PIV data. *Measurement Science and Technology*, 8(12):1493–1501, dec 1997.
- [27] Westerweel, Jerry and Scarano, Fulvio. Universal outlier detection for piv data. *Experiments in Fluids*, 39(6):1096–1100, Dec 2005.
- [28] Garcia, Damien. Robust smoothing of gridded data in one and higher dimensions with missing values. *Computational Statistics & Data Analysis*, 54(4):1167 – 1178, 2010.
- [29] Thieliicke, William. *The flapping flight of birds: Analysis and application*. Ph.D. thesis, University of Groningen, 2014.