ارزیابی میدان سرعت و خط جریان تولید حباب‌ها در سلول الکتروشیمیایی باتری با کمک پردازش تصویر

محمّد طاهریان[۱]، سعید ناهیدی[۲*]

[۱] دانشگاه تهران
[۲] دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

دریافت: بهار ۹۹ پذیرش: بهار ۹۹

چکیده

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در علم سیالات وجود دارد سرعت و میدان جریان درحرکت سیالات است. محققان همواره سعی دارند سرعت سیال و شکل جریان آن را به روش‌های گوناگون برای کاربردهای مختلف ارائه دهند. در موارد زیادی سعی محققان استفاده از روش‌های عددی برای تعیین سرعت سیال است. هدف از اجرای این پروژه مشاهده میدان سرعت جریان سیال (الکترولیت) و تغییرات ویژگی‌های حباب‌های ناشی از واکنش شیمیایی بین کاتد و آند در سلول الکتروشیمیایی همه باتری‌های دارای الکترولیت شناور است. روش سرعت‌سنجی با تصویربرداری از ذرات نیز روشی نوری بدون مزاحمت است که تصویربرداری از جریان و اندازه‌گیری لحظه‌ای میدان سرعت را به‌طور هم‌زمان ممکن می‌سازد. در این روش، سرعت در صفحه‌های اندازه‌گیری می‌شود که موازی جهت جریان است، میدان اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای بسیار وسیع‌تر از سایر روش‌های اندازه‌گیری است و اطلاعات مفیدی دربار ساختار زمانی و مکانی جریان در اختیار قرار می‌دهد. در این پروژه درنهایت هدف دستیابی به کد نرم‌افزار متلب جهت سرعت‌سنجی ذرات و خط جریان سیال است. رویکرد اصلی برای الگوی جریان این سیال و میدان سرعت آن بر اساس روش همبستگی است. اعتبار سنجی صحت این کد نیز با کمک نرم‌افزار PIVlab مورد ارزیابی قرار گرفت.

* **عهده‌دار مکاتبات: saeednahidi@yahoo.com**

کلمات کلیدی: میدان سرعت، خط جریان، باتری، سرعت‌سنجی ذرات، PIVlab.

۱- مقدمه

درروش سرعت‌سنجی تصویر ذرات در یک‌فاصله زمانی بسیار کوتاه مشخص دو عکس از میدان جریان در ناحیه موردنظر گرفته می‌شود که به آن‌یک رکورد گفته می‌شود؛ بنابراین هر رکورد شامل یک جفت تصویر است. برای به دست آوردن مقدار جابجایی محلی ذرات یک سری روش‌های آماری بکار برده می‌شود. بدین ترتیب هر عکس به نواحی مشخص به نواحی بازرسیِ یا پنجره‌های بازرسی تقسیم‌شده و متوسط حرکت ذرات ره‌گیری شده در آن ناحیه به‌عنوان جابجایی محلی سیال قلمداد می‌شود. متوسط جابجایی در نواحی بازرسی از همبسته نمودن تابع ناپیوسته شدت نور در هر ناحیه بازرسی با جفت همان ناحیه در فریم همان رکورد انجام می‌شود. درواقع با قرار دادن فیلتر نوری ۵۳۲ نانومتری در مقابل لنز دوربین نه‌تنها از تراشه حساس به نور محافظت می‌شود بلکه با فراهم ساختن لکه‌های نورانی از ذرات در یک پس‌زمینه تاریک امکان دستیابی به تابع گسسته شدت نور در نواحی بازرسی به‌خوبی فراهم می‌گردد. درگذشته چون دو تابع مجزای شدت نور وجود داشته و تصویر ذرات در هرلحظه ابتدایی و پایانی بر روی یک فریم ذخیره می‌گردید و هر تابع می‌بایست با خودش همبسته شده است، به آن‌همبسته یابی وابسته به خود می‌گفتند؛ اما امروزه با داشتن دو فریم جداگانه در هر رکورد دو تابع مجزا برای همبسته یابی خواهیم داشت؛ اما چنین فرایندی را امروزه همبسته یابی متقاطع می‌گویند. با به دست آمدن همبستگی در هر ناحیه بازرسی آنچه حاصل خواهد شد مقادیر همبسته ناحیه بازرسی موردبررسی در ناحیه اول با جفت آن در فریم دوم است.

این مقادیر همبسته در محل خاصی یک ماکزیمم خواهند داشت که با مقدار جابجایی متوسط ذرات در آن ناحیه بازرسی ارتباط مشخص و معمولی دارد[۱].

تابع گسسته همبسته ϕ از دو تابع شدت نور مذکور به‌صورت زیر تعریف می‌شود که در نوشتارهای متفاوتی ازجمله مرجع[۲] و همچنین در راهنمای دستگاه سرعت‌سنجی تصویر ذرات این تعریف انجام‌گرفته است. درروند کلی استخراج سرعت از زوج فریم‌های یک رکورد، تصحیح‌های

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.5.2]

متفاوتی اعمال می‌گردد. تصحیح‌هایی که مستقیماً در تعریف تابع همبستگی بکار می‌روند به‌صورت یک جفت تابع وزنی برای هر یک از نواحی بازرسی که درنهایت فرمول اصلاح‌شده زیر را ارائه می‌نماید:

$$\hat{R}[k,l]=\frac{1}{d_{IA}^2}\sum_{i=1}^{d_{IA}}\sum_{j=1}^{d_{IA}}W_1[i,j]([I_1[i,j]-\bar{I}_1])W_2[i+k,j+l]([I_2[i+k,j+l]-\bar{I}_2]) \quad (۱)$$

که در آن d_{IA} قطر (اندازه وجه) ناحیه بازرسی برحسب پیکسل، $\bar{I}_1$ و $\bar{I}_2$ متوسط توابع شدت نور I_1 و I_2 است. توابع W_1 و W_2 نیز توابع تصحیح وزنی هستند که بیشتر برای کاهش اثر ذرات نزدیک مرزهای نواحی بازرسی بکار می‌روند. ذرات نزدیک مرزها می‌توانند باعث اعمال جابجایی‌های غیرواقعی در روند همبسته یابی شوند که به این پدیده اثر بایاس می‌گویند. وسترویل در تز دکترایش که برای کاهش اثر بایاس در ماکزیمم همبستگی که توسط آدرین مشاهده‌شده بود، پیشنهاد می‌دهد که از تبدیل کانولوشن دو تابع وزنی یکنواخت و مشابه استفاده شود و مقدار مورد انتظار فرمول فوق را به‌صورت زیر ارائه می‌کند[۳]:

$$E(\hat{R}(k,l))=F(k,l)R(k,l) \quad (۲)$$

که در آن تابع وزنی F(k,l) به‌صورت زیر به دست می‌آید:

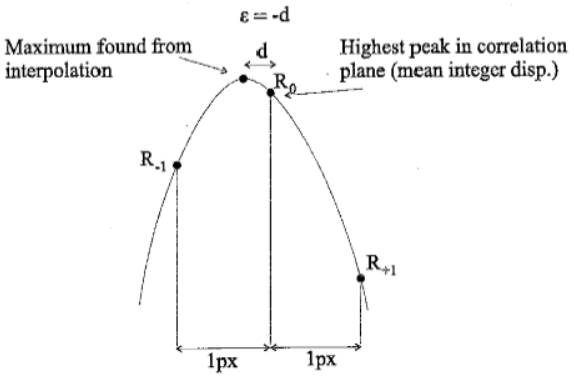
$$F(k,l)=(1-\frac{|k|}{d_{IA}})(1-\frac{|l|}{d_{IA}}) \quad (۳)$$

جهت نرمال نمودن مقدار همبستگی رابطه $\hat{R}(k,l)$ تقسیم بر واریانس توابع شدت نور $\sigma_{I_1}^2$ و $\sigma_{I_2}^2$ می‌شود و به‌این‌ترتیب به‌صورت استاندارد مقدار همبستگی در بازه[۱+،۱-] خواهیم بود.

$$R(k,l)=\frac{\hat{R}(k,l)}{F(k,l)\sqrt{\sigma_{I_1}^2\sigma_{I_2}^2}} \quad (۴)$$

این مقدار همبستگی در مقدار مشخصی از kو l یک ماکزیمم پیداکرده که نشان‌دهنده مقدار متوسط جابجایی در آن ناحیه بازرسی است؛ اما دو مشکل عمده در این فرآیند وجود دارد. اول آنکه در پیاده‌سازی این روش آماری تعداد عملیات ضرب موردنیاز از مرتبه ۴ است؛ که زمان قابل‌توجهی را بخصوص در نمونه‌برداری‌های زیاد به خود اختصاص می‌دهد. دوم آنکه جابجایی در این روش برحسب تعداد پیکسل‌های صحیح محاسبه می‌شود که دقت بسیار کمی داشته و برای افزایش دقت می‌بایست از یک روش تصحیح موسوم به درون‌یابی زیر پیکسلی استفاده نمود. نکته دیگر آنکه به علت تقسیم‌بندی کل عکس خام به قطعات کوچک‌تر نواحی بررسی مشکلی بنام گم‌شدگی جفت ذرات در نواحی نزدیک به مرزها پدید می‌آید. این مشکل ازآنجا وارد کار می‌گردد که در نزدیک مرزها به علت نبود جفت ذره در فریم اول در لبه‌های ورودی یا نبود آن در فریم دوم در لبه‌های خروجی همبسته‌سازی دچار مشکل خواهد شد. برای رفع این مشکل نواحی بازرسی را به‌صورت کاملاً مجزا در نظر نمی‌گیرند بلکه با اعمال همپوشانی در لبه‌های نواحی امکان ره‌گیری ذرات نزدیک به یک ناحیه را با ناحیه کناری فراهم می‌آورد. مقدار همپوشانی نیز بین ۲۵ درصد تا ۷۵ درصد قابل‌تغییر است. علاوه بر مشکل گمشدگی جفت اعمال توابع پنجره برای کاهش اثر بایاس باعث کمرنگ شدن یا در نظر نگرفتن ذرات نزدیک مرزها می‌گردد که باعث هدر رفتن اطلاعات قابل حصول می‌گردد که همپوشانی به‌خوبی می‌تواند آن را بهبود دهد.

قبل از تبدیل خروجی فرآیند همبسته‌سازی به میدان سرعت عملیات افزایش دقت با اعمال درونی زیر پیکسلی انجام می‌گیرد. برای روشن‌تر شدن عملکرد درون‌یابی زیر پیکسلی در افزایش دقت شکل (۱) به‌خوبی می‌تواند پاسخگو باشد. همان‌گونه که اشاره شد آنچه همبسته‌سازی به‌عنوان خروجی ارائه می‌دهد، مقدار این همبستگی در پیکسل‌های صحیح است و در بین پیکسل‌ها هیچ‌گونه جوابی ارائه نمی‌کند. برای سادگی بحث فرض کنید R مقدار همبستگی ماکزیمم در یک محل خاص از تصویر و R_{+1} و R_{-1} به ترتیب مقادیر همبستگی بعدی و قبلی در یک‌جهت خاص (جهت x یاy) باشند. درون‌یابی زیر پیکسلی محل تخمینی ماکزیمم واقعی را نسبت به محل R به‌اندازه کمتر از یک پیکسل فاصله دارد، تخمین خواهد زد.



شکل (۱): تعریف کسر جابجایی به‌دست‌آمده از طریق درون‌یابی زیر پیکسلی پیک همبستگی

روش‌های متفاوتی برای اعمال درون‌یابی زیر پیکسلی وجود دارد. روش‌های معمول مورداستفاده عبارت‌اند از: روش مرکز ثقل، روش سهموی و روش گوسی و روش دوباره‌سازی ویتاکر. همه این روش‌ها، روش‌های سه‌نقطه‌ای هستند. روش گوسین معمولاً تخمین بهتری از محل پیک نسبت به بقیه روش‌ها به دست می‌دهد و بنابراین در بیشتر موارد این نوع درون‌یابی مورداستفاده قرار می‌گیرد.

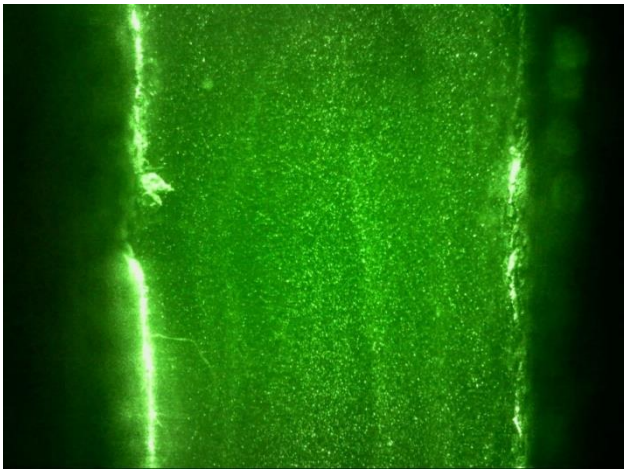
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.5.2]

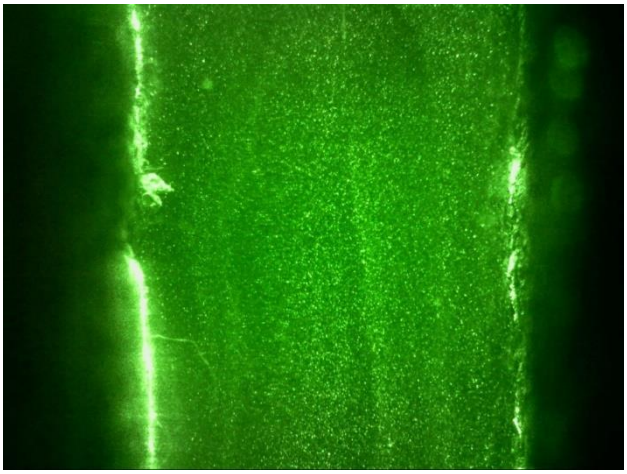
با همه این تدابیر به دلیل ماهیت آماری بودن روندهایی که تاکنون به آن‌ها اشاره شد، بازهم در نتایج نهایی بردارهای جعلی* دیده می‌شود که خوشبختانه حذف یا جایگزینی آن‌ها از روی بردارهایی که در همسایگی آن‌ها هستند روند ساده و مشخصی دارد. گرچه که این روندها آن‌قدر پیچیده نیستند، اما به دلیل اثر نهایی آن‌ها در میدان سرعت بخصوص در مواردی که جایگزینی صورت می‌گیرد، چنین روندهایی بسیار حائز اهمیت هستند و در نحوه اعمال آن‌ها می‌بایست بسیار دقت کرد[۴]. یک همبستگی خوب، همبستگی است که در میدان سرعت به‌دست‌آمده کمترین تعداد سرعت‌های جعلی موجود باشد به‌طوری‌که به هیچ‌گونه تصحیحی نیاز نباشد.

۲- روش تحقیق

برای انجام عملیات پردازش تصویر فریم‌ها، ابتدا ماتریسی تعریف می‌شود که بنابر فرض مجموعه‌ای از حباب‌ها را در بر گیرد. اندازه این ماتریس بسته به سرعت حرکت سیال، کیفیت دوربین فیلم‌برداری و... متغیر است. فرض می‌شود که اندازه این ماتریس ۳۱×۳۱ است بدین معنی که در ماتریسی مربعی به اندازه ۳۱ تعدادی حباب که با عدد اندازه شدت نوری تشکیل شده‌اند. به این ماتریس پنجره بازجویی گفته می‌شود. برای افزایش سرعت در عملیات، ماتریسی دیگری تعریف می‌گردد که در آن ماتریس بازجویی فریم اول برای تطابق در عکس دوم در محدوده مشخصی جستجو کند. به این ماتریس، پنجره جستجو گفته می‌شود. برای مثال اگر پنجره بازجویی، ماتریسی ۳۱× ۳۱ تعریف گردد، اندازه پنجره جستجو می‌تواند ۵۱×۵۱ تعریف شود. پس از تعریف دو پنجره بازجویی و جستجو و انجام عملیات تطبیق بین دو فریم که با بیشینه کردن مقدار همبستگی همراه است به کمک معادله سهمی $R=ax^2+by^2+cxy+dx+ey+f$ درون زیر پیکسلی صورت می‌گیرد. پس از این مرحله به ویرایش بردارهای سرعت پرداخته می‌شود به صورتی‌که بردارهایی از میانگین بردارهای سرعت همسایه‌های مجاور ۱٪ بیش‌تر اختلاف دارند حذف شده و بردارهای میانگین جایگزین می‌گردد. در این پروژه به بررسی تاثیر اندازه پنجره بازجویی و جستجو در فریم‌های فیلم باتری پرداخته می‌شود و صحت نتایج آن با نرم‌افزار PIVlab ارزیابی می‌گردد[۵].



شکل (۲): تصویر فریم اول



شکل (۳): تصویر فریم دوم در یک Δt

۳- نتایج طرح

۳-۱- بررسی اثر تغییرات پنجره جستجو مستقل از اندازه پنجره بازجویی

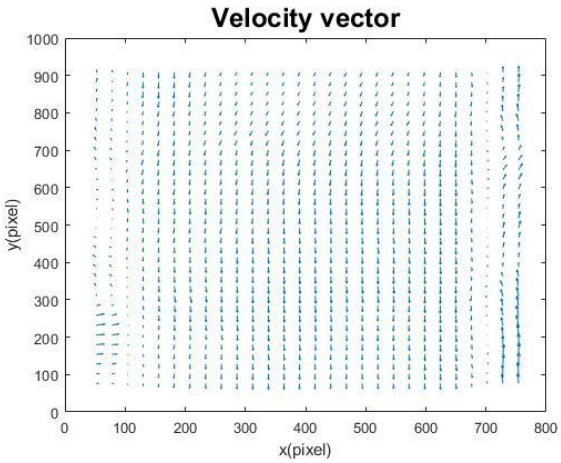
اندازه پنجره بازجویی را ۳۱ انتخاب کرده و مقادیر ۴۱، ۵۱ و ۷۱ و ۱۱۱را برای پنجره جستجو فرض می‌شود. انتخاب مقدار پنجره بازجویی بر اساس سرعت حرکت سیال داخل جریان است. هرچه سرعت سیال بیشتر باشد اندازه پنجره بازجویی نیز بزرگتر انتخاب می‌گردد. در مواردی که جریان توربولنت است، کیفیت فیلم‌برداری برای تعیین سرعت‌سنجی بسیار مهم است.

-پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۴۱:

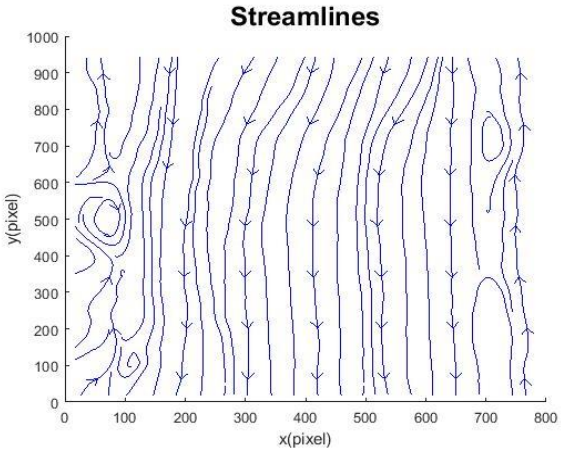
* Spurios vectors

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.5.2]

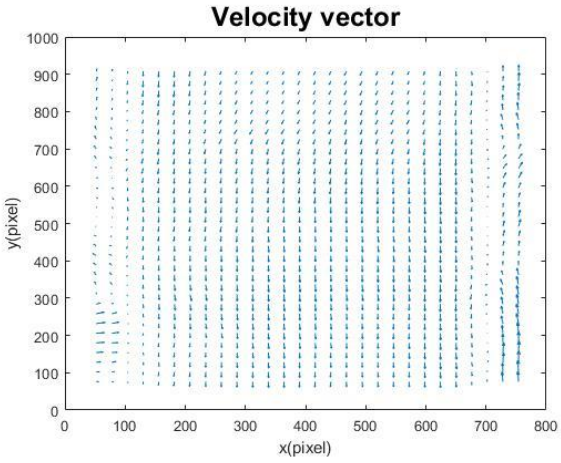


شکل (۴): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۴۱

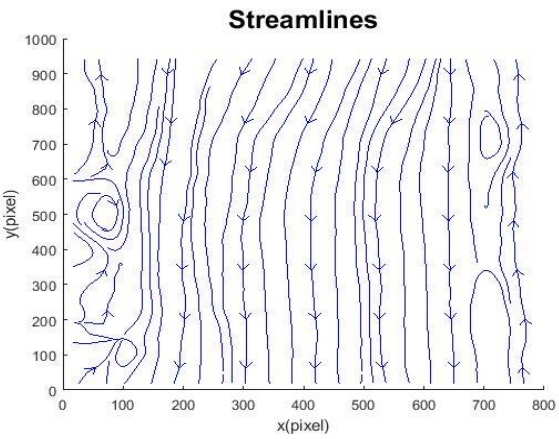


شکل (۵): خط جریان با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۴۱

-پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۵۱:

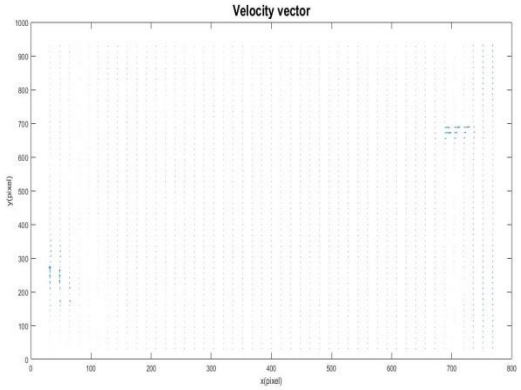


شکل (۶): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۵۱

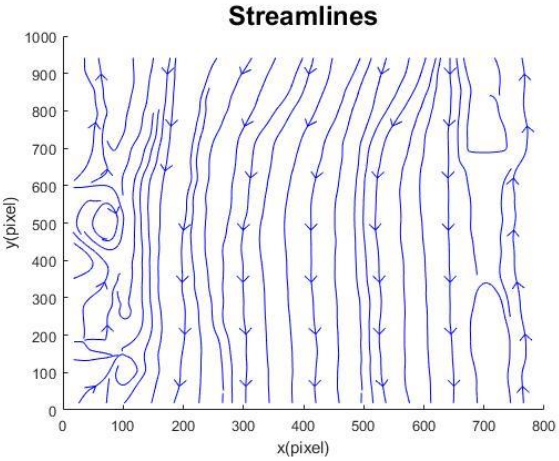


شکل (۷): خط جریان با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۵۱

-پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۷۱:



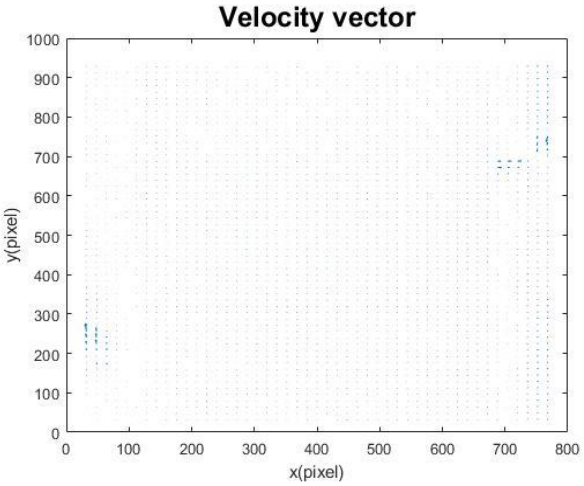
شکل (۸): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۷۱



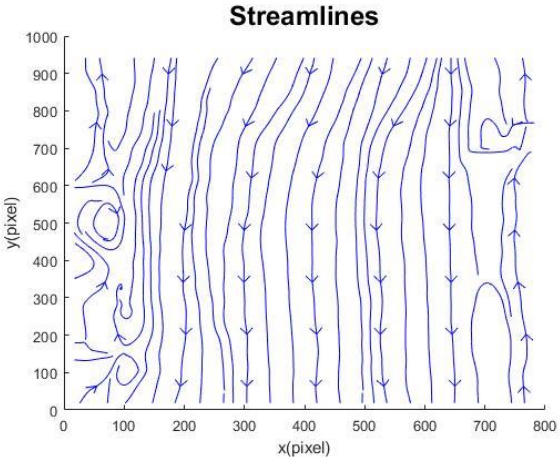
شکل (۹): خط جریان با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۷۱

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.5.2]

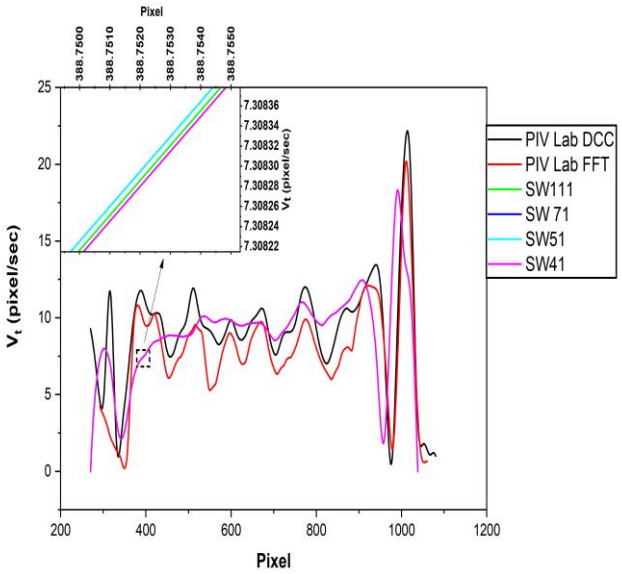


شکل (۱۰): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۱۱۱



شکل (۱۱): خط جریان با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۱۱۱

همان‌طور که در شکل (۱۰) نیز نشان داده‌شده است، اثر پنجره‌ی جستجو بر نتایج ناچیز است و در اینجا به خاطر پایین بودن سرعت جریان عملاً بی‌تأثیر است و تنها بر حجم محاسبات اثر خواهد گذاشت. البته اگر سرعت تزریق جریان زیاد باشد، حد پایین ابعاد پنجره‌ی جستجو عدد بزرگی خواهد بود. همچنین در صورتیکه اندازه پنجره بازجویی افزایش یابد تعداد بردارهای بیشتری به ازای پنجره بازجویی ثابت در پنجره جستجو ثبت می‌گردد که باعث کوچکتر شدن اندازه بردارهای سرعت می‌شود(شکل۶ و شکل ۸). برای مثال در مقایسه اندازه پنجره جستجو ۵۱ با ۱۱۱، با افزایش اندازه پنجره جستجو تعداد بردارها در مساحتی مشخص افزایش می‌یابد در نتیجه ریزتر نشان داده می‌شود.

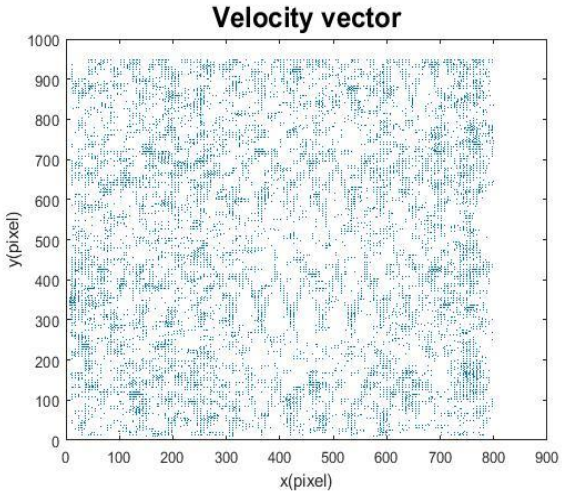


شکل(۱۲): مقایسه داده‌های PIVlab با کد استخراجی در حالت مستقل از اندازه پنجره بازجویی

۳-۲- بررسی اثر تغییر پنجره بازجویی مستقل از اندازه پنجره جستجو

در این قسمت با در نظر گرفتن پنجره جستجو به اندازه ۴۱، مقادیر ۳۵،۳۱،۲۱،۱۱ برای پنجره بازجویی انتخاب می‌شود.

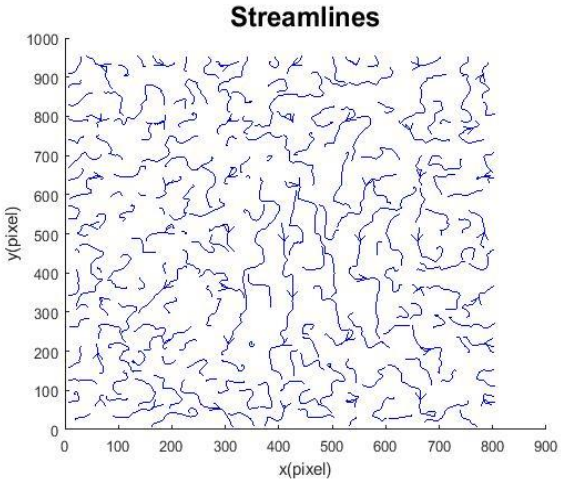
-پنجره جستجو۱۱، پنجره بازجویی ۴۱:



شکل(۱۳): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۱۱، پنجره جستجو ۴۱

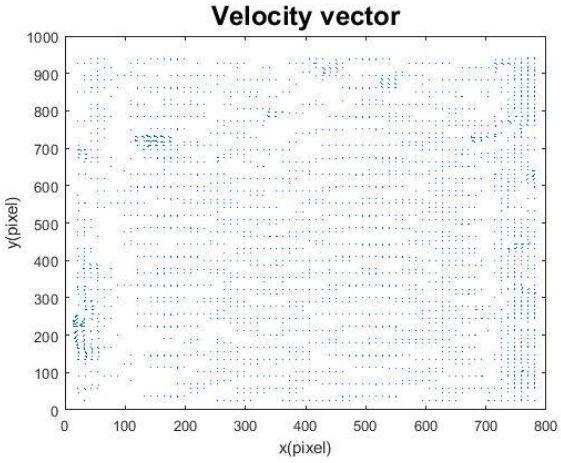
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.5.2]

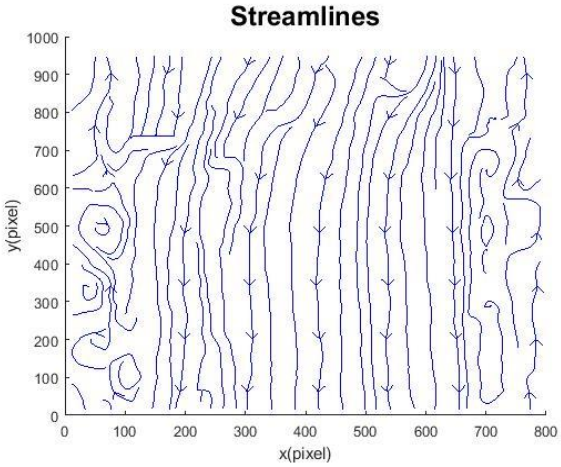


شکل(۱۴): خط جریان با پنجره بازجویی ۱۱، پنجره جستجو ۴۱

-پنجره جستجو ۲۱، پنجره بازجویی ۴۱:

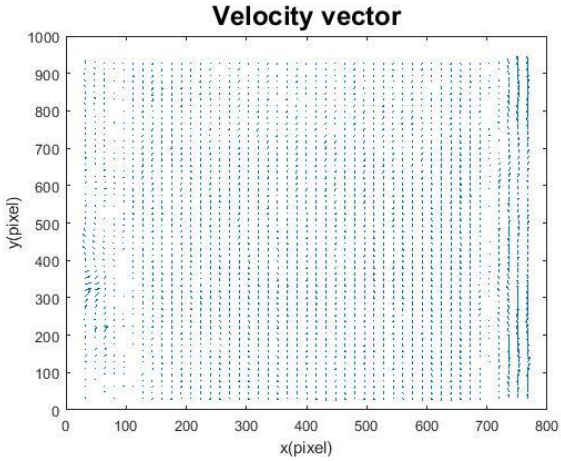


شکل(۱۵): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۲۱، پنجره جستجو ۴۱

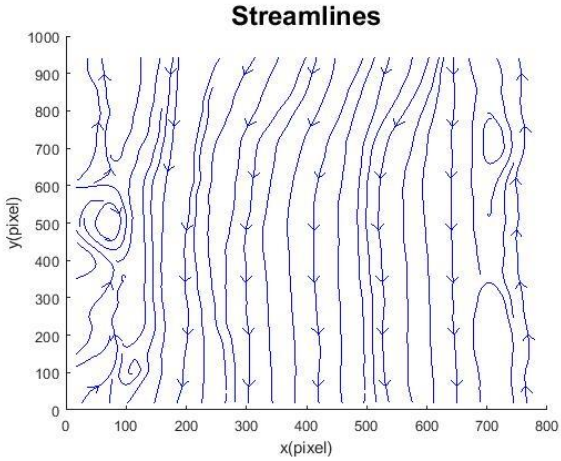


شکل(۱۶): خط جریان با پنجره بازجویی ۲۱، پنجره جستجو ۴۱

-پنجره جستجو ۳۱، پنجره بازجویی ۴۱:

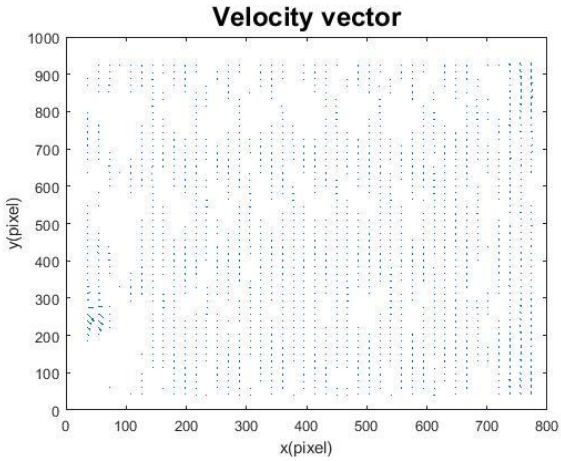


شکل(۱۷): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۴۱



شکل(۱۸): خط جریان با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۴۱

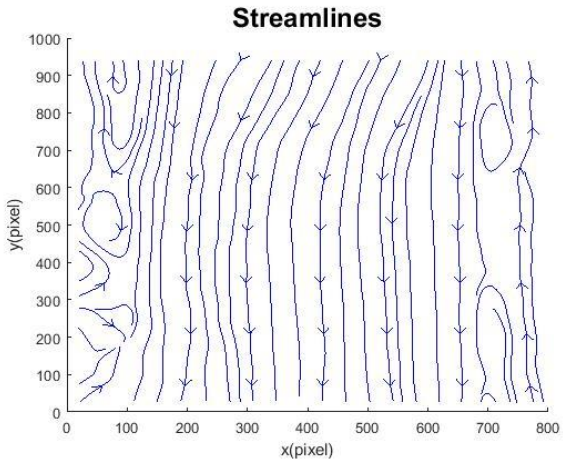
-پنجره جستجو ۳۵، پنجره بازجویی ۴۱:



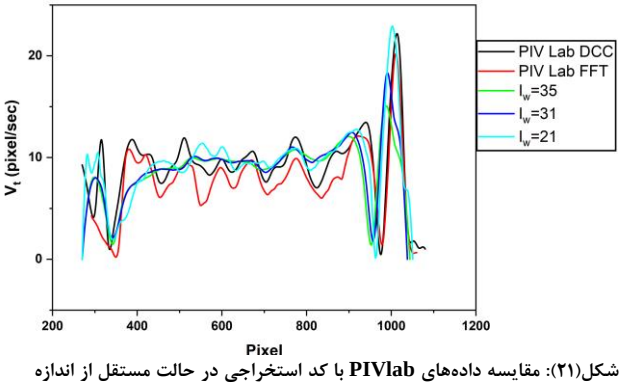
شکل(۱۹): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۳۵، پنجره جستجو ۴۱

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.5.2]



شکل(۲۰): خط جریان با پنجره بازجویی ۳۵، پنجره جستجو ۴۱



شکل(۲۱): مقایسه داده‌های PIVlab با کد استخراجی در حالت مستقل از اندازه پنجره جستجو

روند تغییرات ابعاد پنجره بازجویی، بر نتایج قابل‌توجه است. همچنین هر چه ابعاد پنجره بازجویی کوچک‌تر باشد، تعداد بردارهای سرعت بیشتری به دست خواهیم آورد که این حالت مقدار بهینه‌ای دارد و لزوما با کاهش اندازه پنجره بازجویی دقت اندازه‌گیری افزایش نمی‌یابد که نمود آن در نتایج حاصل با اندازه پنجره بازجویی ۱۱ و ۲۱ نشان داده شده است.

مراجع

[1] *M. Raffel, C. E. Willert, F. Scarano, C. J. Kähler, S. T. Wereley, and J. Kompenhans, Particle image Velocimetry: a practical guide: Springer, 2018.*

[2] *U. Ullum, and P. S. Larsen, "Imaging techniques for planar velocity and concentration measurements," 1999.*

[3] *J. Westerweel, D. Dabiri, and M. Gharib, "The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings," Experiments in fluids, vol. 23, no. 1, pp. 20-28, 1997.*

[4] *J. Chen, and J. Katz, "Elimination of peak-locking error in PIV analysis using the correlation mapping method," Measurement science and technology, vol. 16, no. 8, pp. 1605, 2005.*

[5] *https://pivlab.blogspot.com/p/blog-page_19.html.*

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.1.5.2]