

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

*^۱ محمد 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 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 (الکتروولیت) و تغییرات ویژگی‌های حباب‌های ناشی از واکنش شیمیایی بین کاتد و آند در سلول الکتروشیمیایی همه با تری‌های دارای الکتروولیت شناور است. روش سرعت‌سنجی با تصویربرداری از ذرات نیز روشی نوری بدون مزاحمت است که تصویربرداری از جریان و اندازه‌گیری لحظه‌ای میدان سرعت را به طور همزمان ممکن می‌سازد. در این روش، سرعت در صفحه‌های اندازه‌گیری می‌شود که موازی جهت جریان است، میدان اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای بسیار وسیع تر 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، با تری، سرعت‌سنجی ذرات، PIVlab

می‌گردد. درگذشته چون دوتابع مجزای شدت نور وجود داشته و تصویر ذرات در هر لحظه ابتدایی و پایانی بر روی یک فریم ذخیره می‌گردید و

هرتابع می‌بایست با خودش همبسته شده است، به آن‌همبسته یابی وابسته به خود می‌گفتند؛ اما امروزه با داشتن دو فریم جداگانه در هر رکورد دوتابع 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 موردنرسی در ناحیه اول با جفت آن در فریم دوم است.

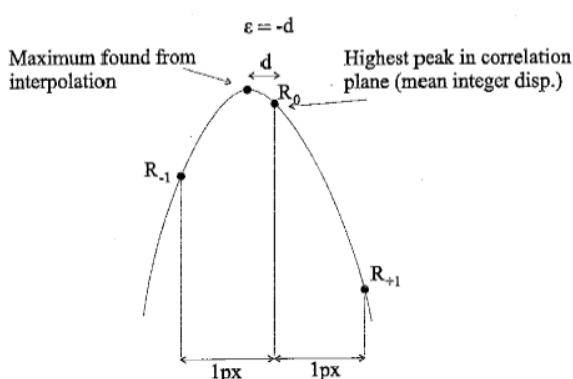
این مقادیر همبسته در محل خاصی یک ماکریزم خواهند داشت که با مقدار جابجایی متوسط ذرات در آن ناحیه بازرسی ارتباط مشخص و معمولی دارد.^[۱].

تابع گسسته همبسته Φ از دوتابع شدت نور مذکور به صورت زیر تعریف می‌شود که در نوشتارهای متفاوتی از جمله مرجع [۲] و همچنین در راهنمای دستگاه سرعت‌سنجی تصویر ذرات این تعریف انجام گرفته است. در روند کلی استخراج سرعت از زوج فریم‌های یک رکورد، صحیح‌های

در روش سرعت‌سنجی تصویر ذرات در یک فاصله زمانی بسیار کوتاه مشخص دو عکس از میدان جریان در ناحیه موردنظر گرفته می‌شود که به آن یک رکورد گفته می‌شود؛ بنابراین هر رکورد شامل یک جفت تصویر است. برای به دست آوردن مقدار جابجایی محلی ذرات یک سری روش‌های آماری بکار برد می‌شود. بدین ترتیب هر عکس به نواحی مشخص به نواحی بازرسی یا پنجه‌های بازرسی تقسیم‌شده و متوسط حرکت ذرات رهگیری شده در آن ناحیه به عنوان 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 نه تنها 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 به خوبی فراهم

نبود آن در فریم دوم در لبه‌های خروجی همبسته‌سازی دچار مشکل خواهد شد. برای رفع این مشکل نواحی بازرسی را به صورت 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 قابل تغییر است. علاوه بر مشکل گمشده‌گی جفت اعمال توابع پنجره برای کاهش اثر بایاس باعث کمونگ شدن یا در نظر نگرفتن ذرات نزدیک مرزها می‌گردد که باعث هدر رفتن اطلاعات قابل حصول می‌گردد که همپوشانی به خوبی می‌تواند آن را بهبود دهد.

قبل از تبدیل خروجی فرآیند همبسته‌سازی به میدان سرعت عملیات افزایش دقت با اعمال درون‌یابی زیر پیکسلی انجام می‌گیرد. برای روشن‌تر شدن عملکرد درون‌یابی زیر پیکسلی در افزایش دقت شکل (۱) به خوبی می‌تواند پاسخگو باشد. همان‌گونه که اشاره شد آنچه همبسته‌سازی به عنوان 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 ماکریتم در یک محل خاص از تصویر و R_{+1} و R_{-1} به ترتیب مقادیر همبستگی بعدی و قبلی در یکجهت خاص (جهت x یا y) باشند. درون‌یابی زیر پیکسلی محل تخمینی ماکریتم واقعی را نسبت به محل R به اندازه کمتر از یک پیکسل فاصله دارد، تخمین خواهد زد.



شکل (۱): تعریف کسر جابجایی بدست آمده 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 سه نقطه‌ای 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.

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

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

که در آن d_{IA} قطر (اندازه وجه) ناحیه بازرسی بر حسب 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 تابع 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 تر دکتراش که برای کاهش اثر بایاس در ماکریتم همبستگی که توسط آذرین مشاهده شده بود، پیشنهاد می‌دهد که از تبدیل کانولوشن دو تابع وزنی یکنواخت و مشابه استفاده شود و مقدار مورد انتظار فرمول فوق را به صورت زیر ارائه می‌کند [۳]:

$$E(\hat{R}(k, l)) = F(k, l)R(k, l) \quad (2)$$

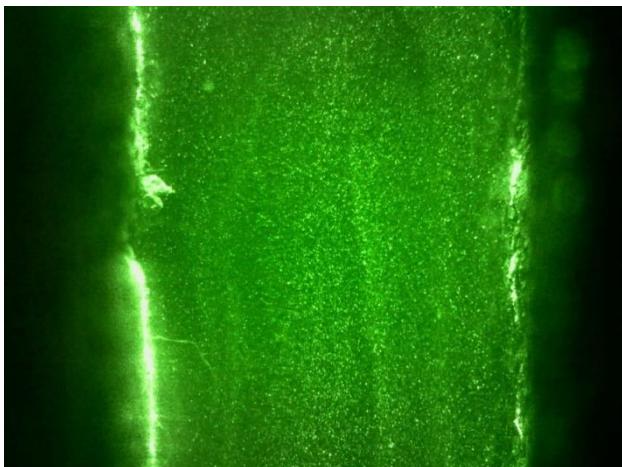
که در آن تابع وزنی $F(k, l)$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$F(k, l) = (1 - \frac{|k|}{d_{IA}})(1 - \frac{|l|}{d_{IA}}) \quad (3)$$

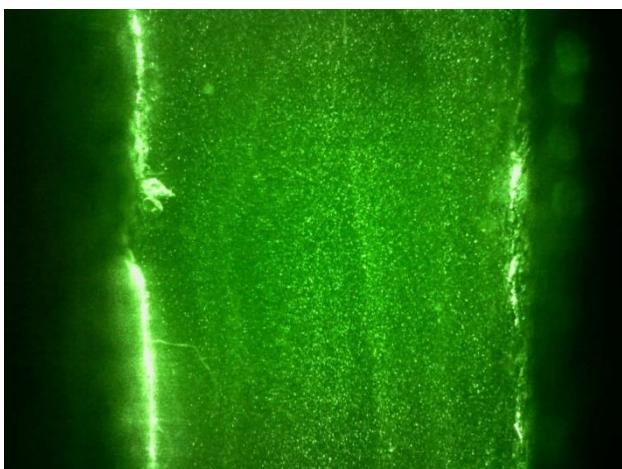
جهت نرمال نمودن مقدار همبستگی رابطه $\hat{R}(k, l)$ تقسیم بر واریانس توابع شدت نور I_1 و I_2 می‌شود و به این ترتیب به صورت استاندارد مقدار همبستگی در بازه $[-1, +1]$ خواهیم بود.

$$(4) \quad R(k, l) = \frac{\hat{R}(k, l)}{F(k, l) \sqrt{\sigma_{I_1}^2 \sigma_{I_2}^2}}$$

این مقدار همبستگی در مقدار مشخصی از $k=1$ یک ماکریتم پیدا کرده 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 قابل توجهی را بخصوص در نمونه‌برداری‌های زیاد به خود اختصاص می‌دهد. دوم آنکه جابجایی در این روش بر حسب 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 گم‌شده‌گی جفت ذرات در نواحی نزدیک به مرزها پدید می‌آید. این مشکل از آنجا وارد کار می‌گردد که در نزدیک مرزها به علت نبود جفت ذره در فریم اول در لبه‌های ورودی یا



شکل (۲): تصویر فریم اول

شکل (۳): تصویر فریم دوم در یک $5t$

۳- نتایج طرح

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

اندازه پنجره بازجویی را 31×31 انتخاب کرده و مقادیر $41, 51, 71$ و 111 را برای پنجره جستجو فرض می‌شود. انتخاب مقادار 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 سرعت سنجی بسیار مهم است.

-پنجره بازجویی 31×31 ، پنجره جستجو 41×41 :

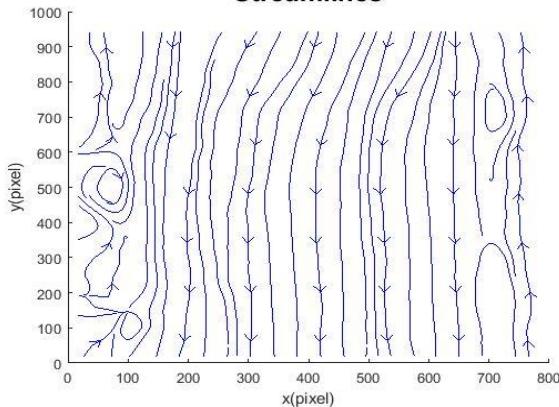
با همه این تدبیر به دلیل ماهیت آماری بودن روندهایی که تاکنون به آن‌ها اشاره شد، بازهم در نتایج نهایی بردارهای جعلی^{*} دیده می‌شود که خوشبختانه حذف یا جایگزینی آن‌ها از روی بردارهایی که در همسایگی آن‌ها هستند روند ساده و مشخصی دارد. گرچه که این روندها آن‌قدر پیچیده نیستند، اما به دلیل اثر نهایی آن‌ها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

۲- روش تحقیق

برای انجام عملیات پردازش تصویر فریم‌ها، ابتدا ماتریسی تعریف می‌شود که بنابر فرض مجموعه‌ای از حباب‌ها در بر گیرد. اندازه این ماتریس بسته به سرعت حرکت سیال، کیفیت دوربین فیلمبرداری و... متغیر است. فرض می‌شود که اندازه این ماتریس 31×31 است بدین معنی که در ماتریسی مربعی به اندازه 31×31 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 31×31 تعریف گردد، اندازه پنجره جستجو می‌تواند 51×51 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 صورتی که بردارهایی از میانگین بردارهای همسایه‌های مجاور $\%1$ بیشتر اختلاف دارند حذف شده و بردارهای میانگین جایگزین می‌گردد. در این پروژه به بررسی تاثیر اندازه پنجره بازجویی و جستجو در فریم‌های فیلم با تری پرداخته می‌شود و صحت نتایج آن با نرم‌افزار PIVlab ارزیابی می‌گردد [۵].

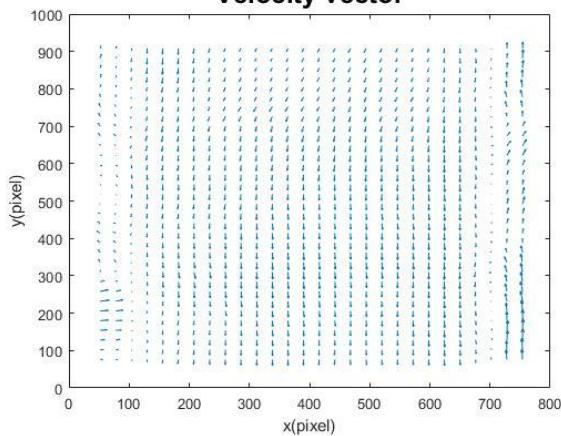
* Spurious vectors

Streamlines



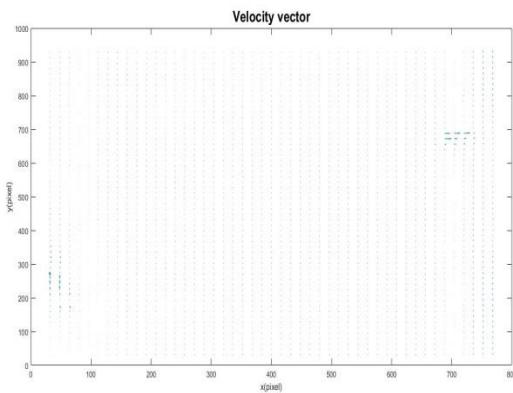
شکل (۷): خط جریان با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۵۱

Velocity vector



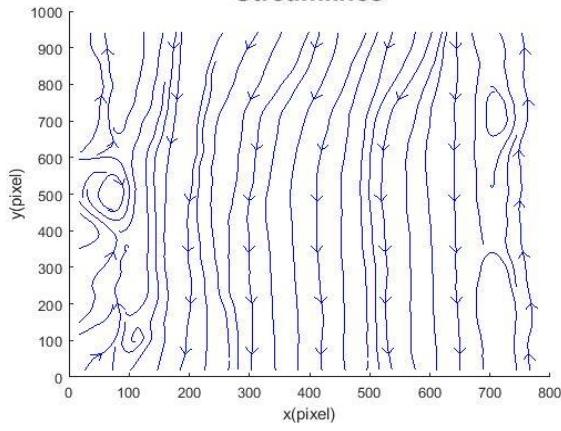
شکل (۴): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۴۱

-پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۷۱



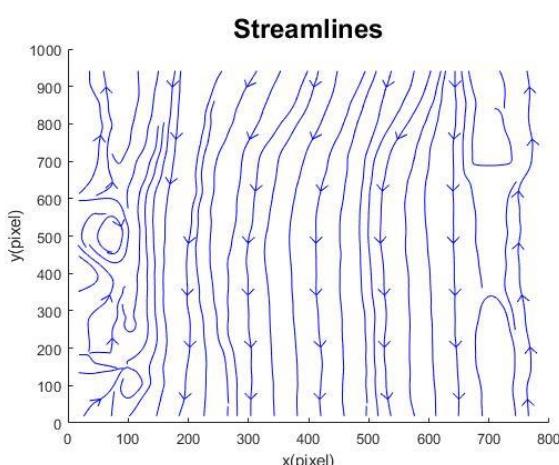
شکل (۸): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۷۱

Streamlines



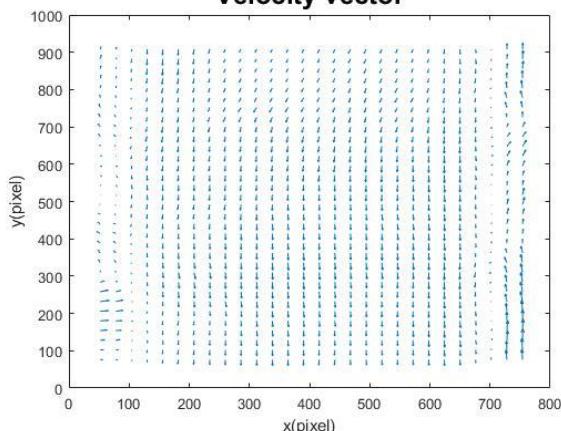
شکل (۵): خط جریان با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۴۱

-پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۵۱

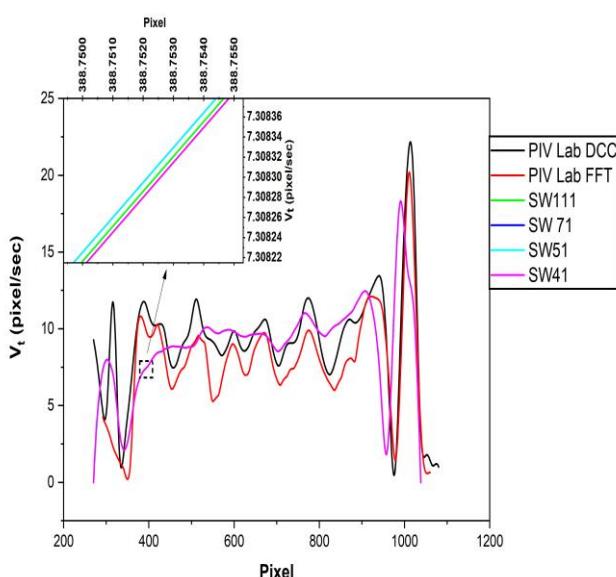


شکل (۹): خط جریان با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۷۱

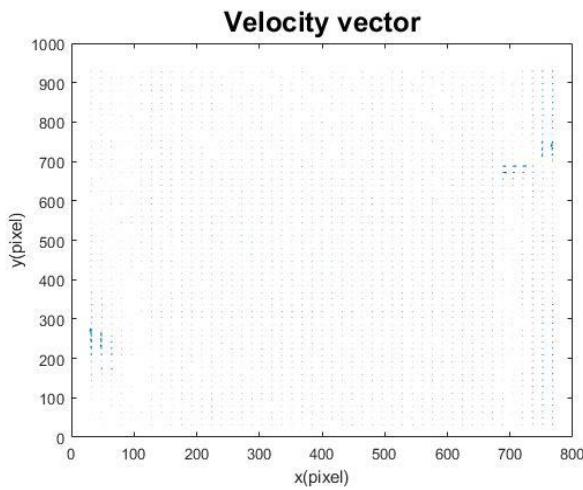
Velocity vector



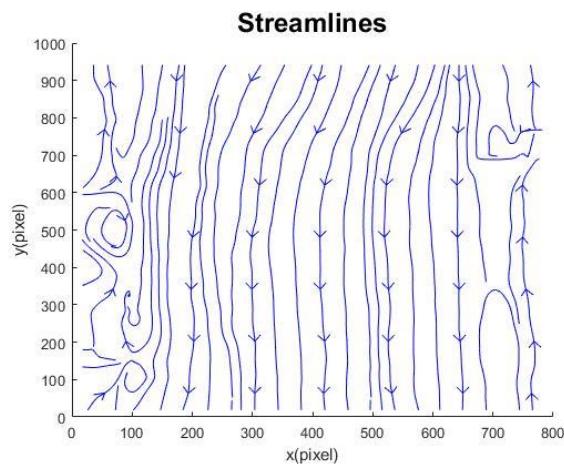
شکل (۶): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۴۱



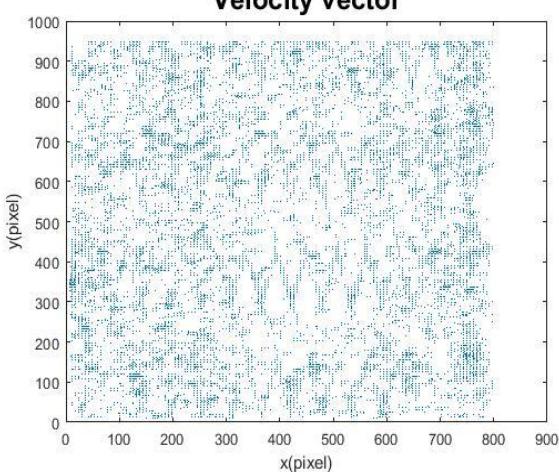
شکل (۱۲): مقایسه داده‌های PIVlab با کد استخراجی در حالت مستقل از اندازه پنجره بازجویی



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

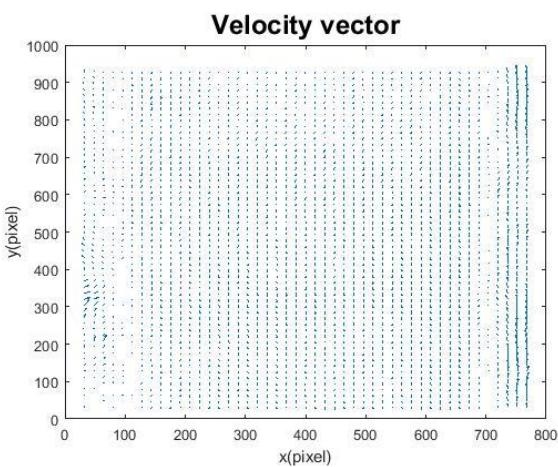


شکل (۱۱): خط جریان با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۱۱۱

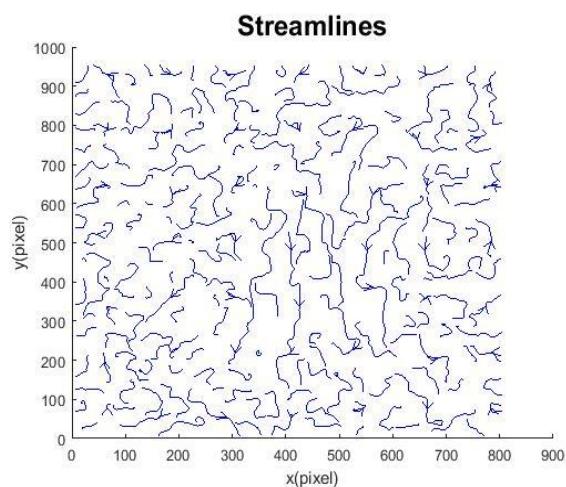


شکل (۱۳): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۱۱، پنجره جستجو ۴۱

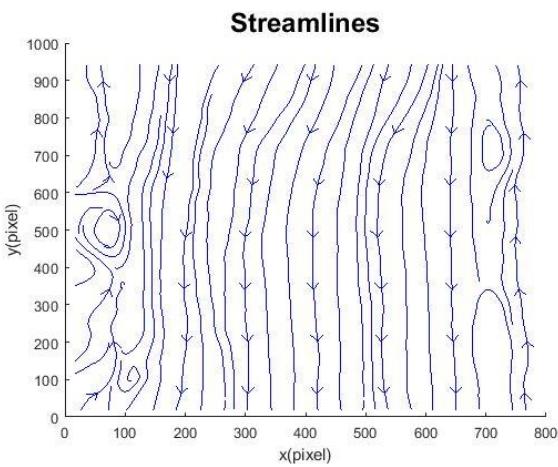
همان‌طور که در شکل (۱۰) نیز نشان داده شده است، اثر پنجره‌ی جستجو بر نتایج ناچیز است و در اینجا به خاطر پایین بودن سرعت جریان عملاً بی‌تأثیر است و تنها بر حجم محاسبات اثر خواهد گذاشت. البته اگر سرعت تزریق جریان زیاد باشد، حد پایین ابعاد پنجره‌ی جستجو عدد بزرگی خواهد بود. همچنین در صورتیکه اندازه پنجره بازجویی افزایش یابد تعداد بردارهای بیشتری به ازای پنجره بازجویی ثابت در پنجره جستجو ثبت می‌گردد که باعث کوچکتر شدن اندازه بردارهای سرعت می‌شود(شکل ۶ 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.



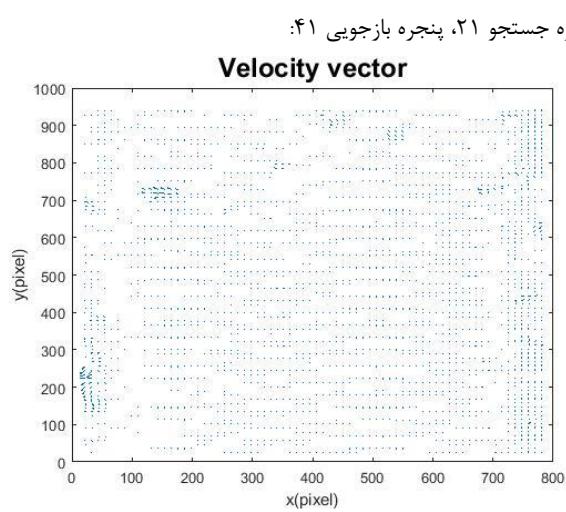
شکل(۱۷): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۴۱



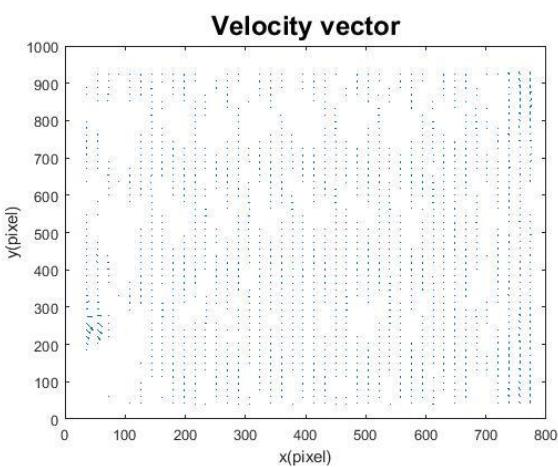
شکل(۱۴): خط جریان با پنجره بازجویی ۱۱، پنجره جستجو ۴۱



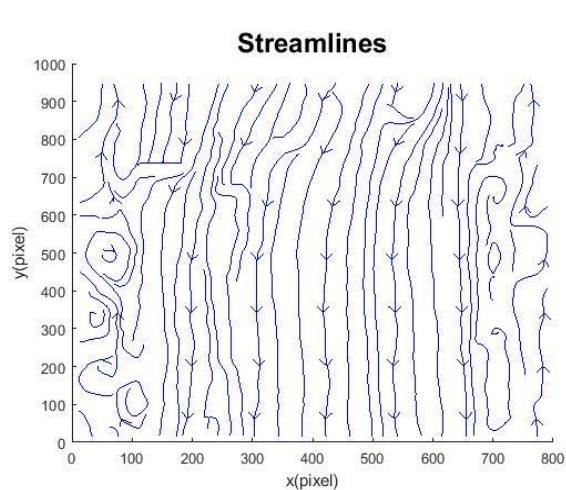
شکل(۱۸): خط جریان با پنجره بازجویی ۳۱، پنجره جستجو ۴۱



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



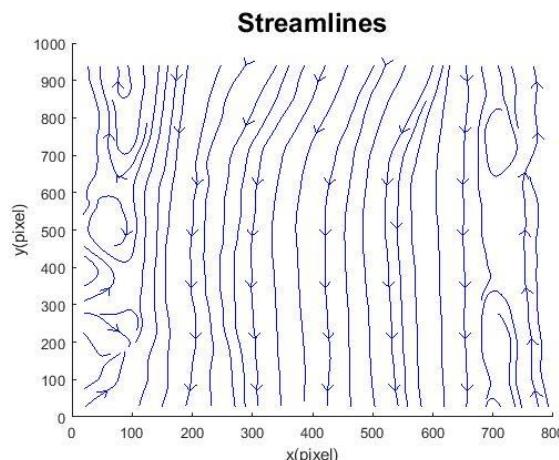
شکل(۱۹): میدان سرعت با پنجره بازجویی ۳۵، پنجره جستجو ۴۱



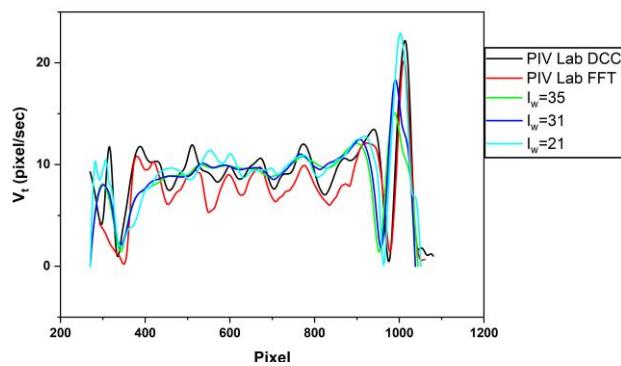
شکل(۱۶): خط جریان با پنجره بازجویی ۲۱، پنجره جستجو ۴۱

-پنجره جستجو ۳۱، پنجره بازجویی ۴۱

- [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.



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 قابل توجه است. همچنین هر چه ابعاد پنجره بازجویی کوچک‌تر باشد، تعداد بردارهای سرعت بیشتری به دست خواهیم آورد که این حالت مقدار بهینه‌ای دارد و لزوماً 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.