



## تحلیل عددی و تجربی سرعت جریان در بستار شفاف موتور ملی EF7 با استفاده از روش تصویر سرعت ذره

علیرضا عابدی<sup>۱</sup>، آرش محمدی<sup>۲\*</sup>، ابراهیم شیرانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد دانشگاه صنعتی فولاد اصفهان، اصفهان، ایران، [asablueiran@yahoo.com](mailto:asablueiran@yahoo.com)

<sup>۲</sup> عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، [amohammadi@sru.ac.ir](mailto:amohammadi@sru.ac.ir)

<sup>۳</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، [e\\_shirani@yahoo.com](mailto:e_shirani@yahoo.com)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

### چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۰۵ بهمن ۱۳۹۹

پذیرش: ۱۰ بهمن ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

موتور ملی

بستار شفاف

تصویر سرعت ذره

مقدار سرعت مایع خنک‌کننده در هر نقطه راهگاه آب موتور متناسب با مقدار خنک‌کاری مورد نیاز تعیین می‌شود. راهگاه آب موتور هندسه پیچیده‌ای دارد و از آنجا که پوسته بدنه و بستار موتور آن را در بر گرفته امکان اندازه‌گیری تجربی سرعت در آن وجود ندارد. به منظور بررسی تجربی جریان یک بستار از جنس اکریلیک شفاف، روی بدنه منتهای شده است و سرعت جریان در نقاط مختلف راهگاه آب موتور EF7 به روش آزمایشگاهی تصویر سرعت ذره<sup>۱</sup> مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. شار مورد نیاز از طریق چرخش تلمبه آب از طریق یک موتور برقی تأمین می‌شود. در روش تصویر سرعت ذره با پخش ذرات معلق از جنس پی وی سی در سیال خنک‌کننده درون راهگاه آب شفاف و تابانیدن پرتو نور و عکس برداری از حرکت ذرات معلق توسط دوربین پر سرعت مکان لحظه‌ای آنها ثبت شده و سپس تحلیل تصویر و استخراج بردارهای سرعت در نقاط مختلف با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصاویر متلب انجام شده است. کار شبیه‌سازی جریان درون راهگاه آب با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام شده تا مقایسه‌ای بین نتایج عددی و تجربی انجام شود. نتایج نشان می‌دهد که در سرعت ۲۵۰۰ د.د.د. بیشتر اختلاف مقدار سرعت عددی و آزمایشگاهی در استوانه<sup>۱</sup> به علت اثرات سه بعدی جریان است. در دور ۳۷۵۰ د.د.د. اثر اختلاف بیشتر از دور ۲۵۰۰ د.د.د. است که علت آن در آشفتگی جریان است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

<sup>1</sup>Particle image velocity

## ۱- مقدمه

برای تعیین مقدار خنک‌کاری بدنه و بستار مطالعه سرعت جریان در هر نقطه از راهگاه‌های آب اهمیت قابل توجهی دارد زیرا حرارت ایجاد شده در بدنه و بستار از طریق جابجایی به مایع خنک‌کننده انتقال می‌یابد. ضریب انتقال حرارت جابجایی تابعی از عدد رینولدز است که خود به سرعت وابسته است. بنابراین برای تعیین مقدار خنک‌کاری مناسب، مقدار سرعت، متناسب با مقدار خنک‌کاری باید تعیین شود.

راهگاه آب موتور هندسه پیچیده‌ای دارد و در نقاط مختلف سطح مقطع آن تغییر می‌کند. با توجه به جنس همبسته آلومینیوم بستار، امکان اندازه‌گیری مستقیم سرعت در آن وجود ندارد.

برای نیل به این هدف از یک نمونه بستار شفاف از جنس پلکسی شفاف از موتور ملی EF7 ساخته شده است. شفاف بودن جنس نمونه امکان مشاهده جریان سیال و اندازه‌گیری سرعت آن را امکان پذیر می‌کند. در زمینه اندازه‌گیری سرعت و مقایسه مقادیر استخراج شده با مقادیر سرعتی که از روش‌های تحلیلی بدست آمده بود، کارهایی انجام شده است.

فرنج و اتکینس در سال ۱۹۷۳ بر لزوم اندازه‌گیری سرعت در مجاری خنک‌کاری به روش غیرتماسی تأکید می‌کرد. طرح الگو<sup>۱</sup> ساختار شفاف برای این نوع اندازه‌گیری ایده‌ای بود که اولین بار توسط این افراد ارائه شد [۱].

زیزلمار و ملروس در ۱۹۷۸ به توضیح روش‌هایی پرداختند که با بکارگیری ساختار شفاف بتوان به اندازه‌گیری سرعت در ناحیه مورد نظر پرداخت. پیشنهاد تجهیزات لازم برای انجام کار از جمله استفاده از اشعه نورانی در اندازه‌گیری و استفاده از ذراتی در سیال که بتواند در برخورد با اشعه نورانی وضعیت حرکت سیال را در آن لحظه خاص نشان دهد، ایده‌های کار سازی بود که زمینه ساخت تجهیزات دقیقی براساس الگو شفاف را بوجود آورد. آنها به اهمیت لزوم عدم شکست نور در استفاده از این روش به خوبی پی بردند. [۲].

شالو و همکاران در سال ۱۹۸۳ لزوم اندازه‌گیری سرعت سیال و روش‌های اندازه‌گیری آن را بررسی کردند. آنها سعی کردند با ارائه نتایجی در انواع روش‌های اندازه‌گیری سرعت سیال، دقت اندازه‌گیری روش‌های غیرتماسی را مورد بررسی قرار دهند [۳].

الفیک و همکاران در ۱۹۸۲ و وایتلا و یانسیس در ۱۹۸۳ آزمایش‌های اندازه‌گیری‌های سرعت سیال را با مایعی دارای چگالی یکسان با مایع بکار رفته در بستار، انجام دادند. استفاده از این روش به دنبال بررسی اثر تغییر متغیرهایی از جمله جایگزین سازی مایعی با مایع به کار رفته در شرایط آزمایشگاهی بود. به طوری که ضمن داشتن خواص آب در مجاری بستار، در برخورد با صفحه نورانی پرتو نور<sup>۲</sup> دخالت کمتری در پراکنده سازی نور داشته باشد [۴].

پرییده و اندرسون در سال ۱۹۸۴ به دشواری‌های روش اندازه‌گیری غیرتماسی سرعت سیال اشاره کردند و سعی کردند راهکارهایی در برای کاهش خطای آزمایشگاهی ارائه دهند. از جمله موارد ایجاد خطا در ثبت داده‌های تجربی، شکست نور در برخورد با موانع موجود در ثبت حرکات سیال بود.

آنها با ایجاد تغییراتی که در شرایط آزمایشگاهی بوجود می‌آوردند، سعی کردند مقادیر خروجی ثبت شده در آزمایشگاه را به رفتار واقعی سیال نزدیک نمایند [۵].

فاینالی و همکاران نیز در سال ۱۹۸۵ سعی کردند با ایجاد مقاطع مختلف در طول راهگاه عبور سیال، به مقایسه الگوی سرعت در این مقاطع بپردازند و الگوهای دقیقی از حرکت سیال را در این مقاطع ثبت نمایند. مقایسه این الگوها رفتار سیال را در نواحی مختلف از بستار را پیش بینی می‌کرد. آنچه در این کار دیده می‌شود، بستار مورد بررسی دارای یک ورودی و یک خروجی به شکل افقی و مجزا از استوانه بررسی شده و مقاطع مختلف متوالی برای بررسی رفتار سیال در راهگاه مربوطه زده شده است [۶].

همچنان با طرح ایده استفاده از مایع مشابه در بستار برای کاهش شکست نور، تامپسون و همکاران در ۱۹۸۹ مایعی انتخاب کردند که با دقت زیاد می‌توانست از لحاظ چگالی و سرعت مشابه مایع بکار رفته در بستار باشد. این مایع از ترکیب روغن ترینتین با تتراهیدرو نفتالین (تترالین) بود که به شرایط کاری آب بسیار شبیه بود و می‌توانست نقش خوبی را در عدم شکست نور بازی کند [۷].

اویاگی و همکاران در سال ۱۹۸۸ متغیرهای تأثیرگذار در اندازه‌گیری سرعت سیال را بررسی کردند. آنها دریافتند چنانچه مقدار گرد استفاده شده در درخشان سازی ذرات سیال لازم متناسب با بازه سرعت موجود در مجرای مربوطه به کار برده نشود، با نتایج خروجی به دور از شرایط واقعی مسأله روبرو خواهیم بود [۸].

هونگ و براسمر در سال ۱۹۸۹ به تشریح روش LDA و PIV و چگونگی استفاده از چنین روشی در اندازه‌گیری سرعت سیال در مجاری خنک کار پرداختند. آنها برای اولین بار ایده ریخته‌گری الگوی شفاف از بستار و بدنه را برای دستیابی به سرعت سیال مطرح کردند.

انتخاب جنسی که ضمن شفافیت بتواند انعطاف لازم را برای تحمل تنش‌های وارده در انطباق با بدنه استوانه داشته باشد، از دیگر مباحث چالش برانگیز مطرح شده در این کار بود. هرچند آنها موفق شدند به طراحی و ساخت نمونه اولیه‌ای از دیواره‌های شفاف جداره، با هزینه‌ای که جامعه مهندسی خودرو برای انجام این طرح اختصاص داد، پرداخته و در آزمایش‌ها خود بکار ببرند [۹].

میز فورد و پستلتویت در مقاله روشی ۱۹۹۳ بر استفاده از روش LDA و PIV در اندازه‌گیری سرعت سیال تأکید کردند و سعی کردند با

<sup>2</sup> Laser

<sup>1</sup> Model

دیواره‌های موازی مطالعه می‌کردند، سعی کردند الگو و پایه آزمایش را طوری طراحی نمایند که ساختار واقعی موفقیت اجزا سامانه خنک‌کاری در آن حفظ شود.

برای محدودسازی اثرات نوسانات فشار در تلمبه از راهگاه‌های طولانی با واگرایی ملایم در ورودی‌ها و همگرایی ملایم در خروجی‌ها استفاده شد. نرخ جریان اندازه‌گیری شده توسط شارسنج در دو مرحله ۱۳۰ و ۲۴۰ لیتر بر دقیقه اندازه‌گیری می‌شدند و بستار مورد آزمایش ۴ استوانه و ۱۶ دریچه مورد استفاده قرار می‌گرفت.

آنها برای اندازه‌گیری سرعت از روش LDA و PIV در میدان آشفته استفاده نمودند و چون نوسانات آماری سیال در حین عبور در نظر گرفته می‌شد، تصاویر دست آمده از حرکت سیال رفتار متفاوتی را در کسری از ثانیه در راهگاه مورد بررسی نشان می‌داد و آزمایش چندین بار برای تأیید نتایج تکرار شد [۱۷].

در سال ۲۰۰۸، هانگ وی و همکاران و به توزیع نابرابر نرخ جریان در راهگاه‌های آب در نقاط مختلف بستار پی بردند و نتایجی مبنی بر عدم خنک‌کاری یکنواخت بستار منتشر کردند [۱۸].

گو فانگ و همکاران در ۲۰۱۰ با ارایه طراحی مناسب در قطر مسیر راهگاه‌های آب بستار سعی کردند به رفع مشکل توزیع نابرابر در بستار بپردازند. آنها با استفاده از خمیر چسبناکی که در محل دیواره مسیرها به کار می‌بردند، تلاش کردند به تغییر قطر مسیرها در نواحی مورد نیاز بپردازند و توزیع جریان نسبتاً برابری را خصوصاً در سطح پل‌ها در محل دریچه دود بدست آوردند. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از سرعت‌سنج داپلر (LDA) و PIV انجام می‌شد [۱۹].

گو فانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ بار دیگر سعی کردند به صحت‌گذاری نتایج تجربی حاصل از روش‌های PIV و LDA با استفاده از سنج فشار بپردازند. در واقع آنها قصد داشتند با استفاده از یک روش تجربی مستقیم قابل اطمینان یافته‌های آزمایشگاهی را تأیید کنند [۲۰].

در این مقاله سرعت جریان سیال خنک‌کننده در راهگاه آب موتور ملی پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا سامانه آزمایشگاهی برای مدار خنک‌کاری موتور که در برگرنده موتور، تلمبه، مبدل و گرم‌کننده است، آماده شده است. سپس با تابش پرتو نور و دوربین پر سرعت سیال در نقاط مختلف عکس برداری شد و با استفاده از پردازش تصویر متلب مقدار بردار سرعت در نقاط مختلف اندازه‌گیری شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

**۲-۱- معرفی روش اندازه‌گیری سرعت تصور سرعت ذره**  
سامانه PIV که برای اولین بار توسط لایوین در سال ۲۰۰۲ گسترش یافت، در اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌شود. همانطور که در شکل (۱) دیده می‌شود، دستگاه پرتو نور برای درخشان سازی ذرات تعقیب شده در بستار به روش PIV استفاده می‌شود.

برطرف‌سازی برخی از ایرادهای این روش در آزمایشگاه، نتایج دقیق‌تری ارایه نمایند.

دقت نتایج با استفاده از روش‌های تماسی مستقیم بررسی می‌شد و در صورتی که پاسخ در بازه مجاز اندازه‌گیری‌های تماسی قرار نداشت، شرایط آزمایشگاهی که منجر به ایجاد چنین خطاهایی در ثبت مقادیر سرعت شده بود شناسایی و بررسی می‌شد. لزوم انجام آزمایش‌ها پی در پی برای شناسایی و رفع ایراد عوامل آزمایشگاهی بخش اصلی کار انجام شده توسط این افراد را تشکیل می‌داد [۱۰].

کولت و همکاران در چهارمین همایش خودرو و فناوری موتور در ۱۹۹۳ در انتخاب روش LDA و PIV حساسیت روش را نسبت به انتخاب الگوی آشفته و شکل دیواره را در مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی بررسی کردند. آنها دریافته‌اند تنها در صورتی داده‌های استخراج شده از آزمایش توسط الگو شبیه‌سازی تأیید می‌شود که هنگام واردسازی متغیرها در شبیه‌سازی از مقادیر ثبت شده توسط حسگرهای فشار و دمای خوانده شده در شرایط آزمایشگاهی استفاده شود و عدد انتخابی برای وارد سازی شدت آشفته در نرم‌افزار حتی الامکان به واقعیت مسأله نزدیک باشد [۱۱].

وفادیز و همکاران در آزمایش‌ها خود بر روی سیال در ۱۹۹۰ ترکیبات روغن با محدوده چگالی مشابه را مبنای آزمایش قرار داده و سعی کردند با تغییر در ترکیباتشان رفتار آنها را در برخورد با اشعه نورانی بررسی کردند. گزارشی که این افراد منتشر کردند ترکیبات سیال به همراه مقدار پراکنده سازی آنها در برخورد با اشعه نورانی را در دسترس قرار می‌داد [۱۲].

ویت لا و همکاران، در ۱۹۹۱ از دیگر افرادی بودند که الگوی شفاف ساخته شده با استفاده از جنس عدم شکست در دیواره را با استفاده از روش‌های نوری در اندازه‌گیری‌های میدان سرعت سیال بکار بردند [۱۳]. همچنان که کار اندازه‌گیری سرعت سیال در بستار پیچیدگی‌های بیشتری را از خود نشان می‌داد، واترسون و دیگران در سومین کنفرانس شبیه‌سازی جریان در ۱۹۹۵ در پرتغال اظهار داشتند که جریان در پایین دست استوانه‌ها ثابت نیست و از یک استوانه به استوانه دیگر تغییر می‌کند. شبیه‌سازی نیز در یک هندسه ساده در ساختار دو بعدی و یا سه بعدی وجود چنین پدیده‌ای را اثبات می‌کرد [۱۴].

داویس و چاریست در سال ۱۹۹۶ نیز با تغییر در شرایط آزمایشگاهی موفق به دستیابی به نمایش برداری بهتری از حرکت سیال شدند. روش آنها استفاده از صفحه نورانی به صورت مستقیم و بی‌واسطه در مقطع مورد نظر به منظور حذف عوامل پراکندگی نور در استفاده از روش‌های نوری بود [۱۵].

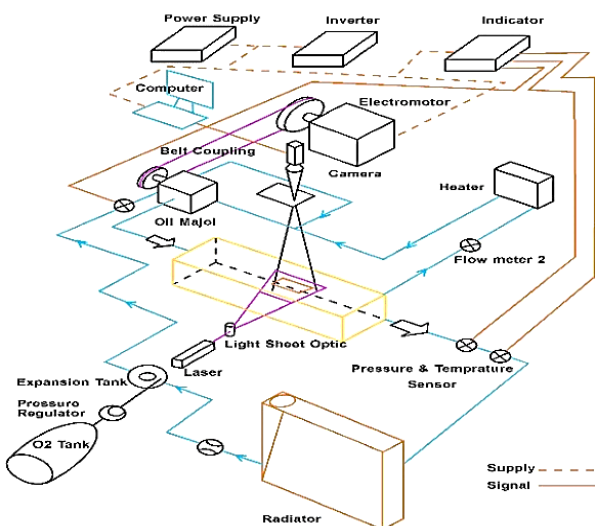
بدروکس در سال ۱۹۹۶ با تقویت پالس انرژی پرتو نور از لحاظ قدرت و فرکانس محدوده بردار سرعت منظم تری را در مقایسه با نتایج قبلی بدست آمده در استفاده از روش‌های اندازه‌گیری تماسی ارایه نمایند [۱۶]. چارت رای و همکاران، در آزمایشگاه هیدرودینامیک در سال ۱۹۹۹ در فرانسه بر اساس ساختار دو بُعدی پوازی که جریان سیال را بین

## ۲-۲- سامانه آزمایشگاهی

به منظور آماده‌سازی سامانه خنک‌کاری، اجزا سامانه باید در مختصات مکانی مطابق با مدار خودرویی خنک‌کاری سمنند قرار گیرند. تلفات جریان ناشی از طول لوله‌های رابط و محل خمیدگی‌ها در شبیه‌سازی باید مشابه با موتور EF7 باشد. در جدول ۱ مشخصات فنی موتور آورده شده است. لزوماً اینکه به منظور عدم حذف تلفات ناشی از واحد دمابان در شرایط کار واقعی موتور، از دمابانی استفاده شده که با انجام تغییرات مکانیکی در آن دریچه عبور جریان در آن کاملاً باز نگه داشته شده است. ترتیب اجزا برای انجام آزمایش بطور شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. سیال با عبور از مبدل می‌کند و از شارسنج ۱ در مسیر عبور جریان می‌گذرد و به سمت پودمان روغن چسبیده به بدنه موتور EF7 جریان می‌یابد. در پودمان روغن آب به داخل بدنه تلمبه شده و پس از عبور از مجموعه استوانه و بستار شفاف با عبور از دمابان به سمت ورودی مبدل می‌رود. ضمن اینکه به منظور شبیه‌سازی کامل مسیر جریان، مسیر جریان فرعی رفت به سمت گرم کن و بازگشت به سمت پودمان روغن در نظر گرفته شده است که در ورودی آن یک شارسنج کار گذاشته شده است. در شکل (۳) سامانه آزمایشگاهی با جزئیات مربوط به مدار خنک‌کاری نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصه‌های فنی موتور EF7

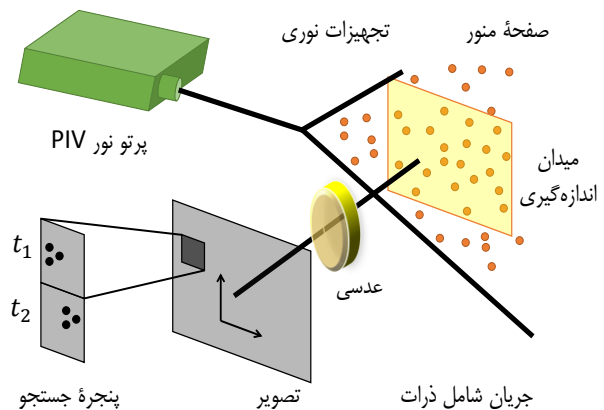
قطر سنبه	۷۸٫۶ میلی متر
طول پیمایش سنبه	۸۵ میلی متر
نسبت تراکم	۱۱
حجم جابجایی	۱۶۴۶CC
طول دسته سمبه	۱۳۳٫۵



شکل ۲: طرح ترتیب اجزا برای انجام آزمایش

پرتو نور به شکل یک ورقه نورانی در خواهد آمد و این زمانی است که بازوی راهنمای پرتو نور برای تشکیل ورقه نورانی به آن متصل گردد. طول کانونی استوانه داخلی ۱۰ میلی‌متر و زاویه واگرایی ۳۰ درجه است. دوربین CASIO EX-F1 ثبت سرعت با قابلیت تصویربرداری پیشرفته با پرده<sup>۱</sup> دو مرحله‌ای و قدرت جداسازی<sup>۲</sup> ۷۲ dpi استفاده شده است. اندازه هر مربع<sup>۳</sup> برای شفاف‌سازی تصاویر ۲۱۱۲ × ۲۸۱۶ است. واحد شامل سیم‌های راه انداز دوربین و پرتو نور از یک رایانه مرکزی با نرم‌افزار نصب شده بر روی آن تشکیل شده است که برای ثبت مقادیر اندازه‌گیری شده استفاده شده است.

روش سرعت‌سنجی با تصویر برداری از ذرات نیز روشی نوری بدون مزاحمت است که تصویر برداری از جریان و اندازه‌گیری لحظه‌ای میدان سرعت را به طور هم زمان ممکن می‌سازد. در این روش، سرعت در صفحه‌ای اندازه‌گیری می‌شود که موازی برای جریان است، میدان اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای بسیار وسیع تر از سایر روش‌های اندازه‌گیری است، و اطلاعات مفیدی درباره ساختار زمانی و مکانی جریان در اختیار قرار میدهد.



شکل ۱: پیکربندی کلی یک سامانه PIV دو بُعدی [۲۰].

در این سامانه، از میدان اندازه‌گیری جریان حاوی ذرات مخصوص دو تصویر با فاصله زمانی اندک گرفته می‌شود. مبداء با تعیین جابجایی ذرات در این فاصله زمانی از روی تصاویر، سرعت ذرات در هر بخش از میدان اندازه‌گیری محاسبه خواهد شد این سامانه همچنین امکان می‌دهد که بتوان از آن چون ابزاری برای اندازه‌گیری ساختار آشفتگی در شرایط مختلف بهره برد و به برخی مقیاس‌های آشفتگی دسترسی پیدا کرد.

با این همه، به دلیل مشخصه سامانه‌های معمولی PIV (پایین بودن فرکانس پالس لیزر یا سرعت تصویربرداری) و پایین بودن تفکیک پذیری تصویری سامانه، استفاده چندان از سامانه PIV برای تعیین مقیاس‌های آشفتگی در جریان‌های پیچیده نشده است.

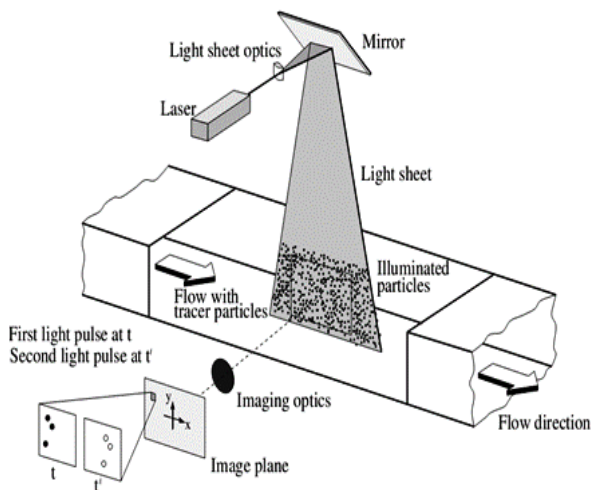
<sup>3</sup> Pixel

<sup>1</sup> Shutter

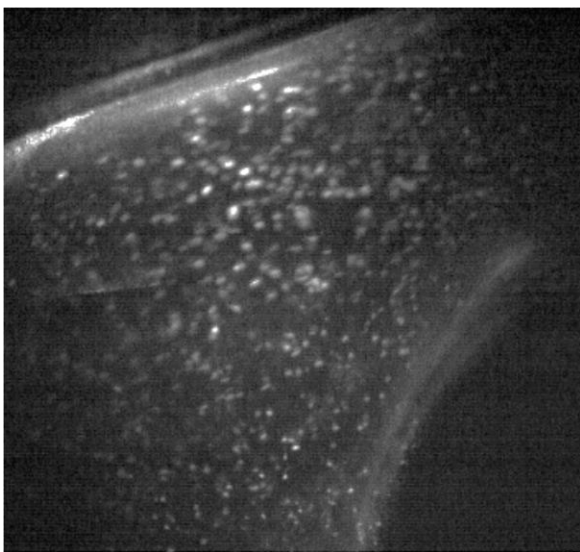
<sup>2</sup> Resolution

در شکل (۵)، اشعه پرتو نور به صورت مثلثی با زاویه رأس ۳۰ درجه گسترده شده و عمود بر سطح محفظه احتراق و موازی با دیواره شفاف طولی بستار تابانیده می‌شود. محل قرارگیری دوربین CASIO EX-F1 به گونه‌ای است که عمود بر گستره نور تابانده شده و دیواره شفاف طولی در یک سمت بستار نصب می‌شود. ذرات آلومینا برای تعیین مسیر ذرات با قطری کمتر از ۲۰ میکرومتر و چگالی  $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  با قابلیت انعکاس ۱,۳۳ در نظر گرفته شده است.

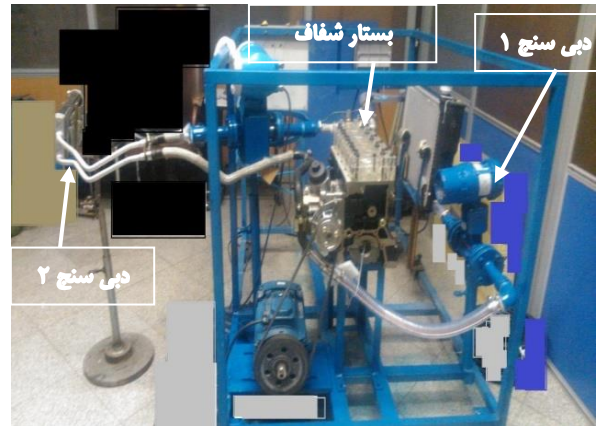
این ذرات، چند وجهی غیر منظم هستند که وجوه آن به صورت کاملاً هموار به یکدیگر اتصال یافته است. ذراتی بزرگ سفید که می‌تواند مسیر جریان را با دقت خوبی دنبال کرده و سطوح خشن آنها قابلیت پخش نور برای تعقیب در سامانه PIV را فراهم سازند. در شکل (۶) نمونه‌ای از ذرات پخش شده درون راهگاه آب بستار شفاف که در اثر تابش پرتو نور درخشان شده‌اند را نشان می‌دهد.



شکل ۵: طرح اندازه‌گیری سرعت



شکل ۶: نمونه انعکاس نور ذرات آلومینا



شکل ۳: سامانه آزمایش مدار خنک‌کاری

مطابق با شکل (۴) به منظور انجام آزمایش PIV و اندازه‌گیری‌های مربوطه، مسیر شفاف برای عبور مایع خنک‌کار در نظر گرفته شده است. الگو با استفاده از اکریلیک شفاف با استفاده از الیاف کشسان با روش ریخته‌گری ساخته شده است. طول، پهنا، و ارتفاع الگو بترتیب ۱۵۵، ۴۰۰ و ۶۵ میلی‌متر است.



شکل ۴: بستار شفاف موتور EF7

با انتخاب کلیه تصاویر و استخراج بردار میانگین از کلیه تصاویر، بردار سرعت مقدار قابل قبولی را در محدوده دقت مورد نیاز بدست خواهد داد.

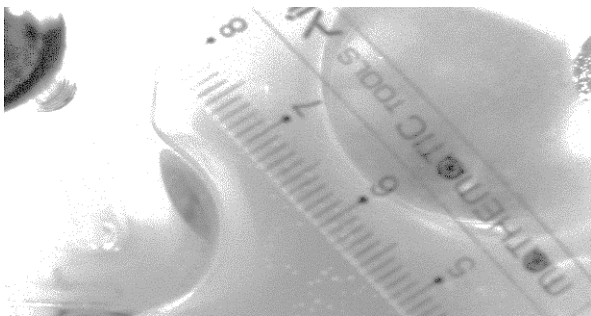
برای دستیابی به کمیت بردار سرعت برحسب واحدهای رایج اندازه‌گیری به تصویر کالیبره شده‌ای نیاز است تا بتواند بعنوان مبنای اندازه‌گیری، مورد استفاده قرار گیرد. به منظور ثبت تصویر اول، از خط اثر یک Marker بر روی شیشه شفاف و قرار دهی آن بر روی الگو در ناحیه مورد نظر استفاده شده است.

در تصویر دوم خطکش اندازه‌گیر مستقیماً در محل تصویربرداری جانمایی شده و از آن عکس گرفته شده است. از این تصویر به منظور دستیابی به مقدار سرعت واقعی سیال در ناحیه مربوطه استفاده می‌شود. نکته اساسی در تنظیم کردن بردارها فاصله مقطع اندازه‌گیری سرعت سیال تا دوربین است.

از آنجا که اندازه‌گیری‌ها در ارتفاع ۱,۷ میلی‌متر از سطح فوقانی الگو انجام می‌شود باید ارتفاع دوربین از سطح فوقانی الگو به همان مقدار یعنی ۱,۷ میلی‌متر بالاتر بیاید.

شایان ذکر است در استفاده از این روش با تکرار آزمایش می‌توان دقت اندازه‌گیری را در محدوده مجاز قرار داد. در بخش تنظیم در نرم‌افزار فاصله‌ای در ناحیه مورد بررسی برای تنظیم کردن تصاویر باید فراخوانی شود، ضمن اینکه فاصله زمانی هر یک از تصاویر ثبت شده نیز باید تعیین گردد.

دو نمونه از تصاویری که به منظور انجام عملیات تنظیم استفاده شده است در شکل (۸) نشان داده شده است. در این تصویر مستقیماً از خط کش مدرج برای تنظیم تصاویر ضبط شده استفاده شده است.



شکل ۸: استفاده از خط کش برای تنظیم بردار سرعت

برای انجام کار نهایی ابتدا باید به صورت آزمایشی به ثبت مقادیر سرعت سیال و تحلیل نتایج پرداخته شود. به این منظور لیوانی با قطر ۶۷ میلی‌متر تا ارتفاع ۶۴ میلی‌متر از آب پر شده و با سرعت ۱ دور بر ثانیه به گردش در آمد که این سرعت با چرخش ابزاری مثل قاشق در سیال در طی ضرب آهنگ ۱۰ ثانیه انجام شد.

## ۲-۳- تعیین مقدار وزنی گرد PVC مخلوط در مخلوط آب و اتیلن گلیکول

برای تعیین مقدار گرد مناسب در سیال، ابتدا آزمایش سیال در لیوان را با چهار مقدار وزنی متفاوت گرد PVC انجام شد تا با مقایسه بردارهای سرعت در چهار حالت به مقدار مناسب گرد مخلوط شده با سیال در آزمایش نهایی پی برده شود. این چهار مقدار اختلاط در شکل (۷) نمایش داده شده است.



شکل ۷: تعیین مقدار وزنی گرد PVC

مقدار گرد مخلوط شده در لیوان اول تا چهارم بترتیب ۲۶، ۴۰، ۵۶ و ۸۰ میلی‌گرم بود. حجم آب ۰,۲۲۵ لیتر و در هر مورد سیال در مقابل دوربین به چرخش در آمده و با سرعت ۶۰ تصویر در ثانیه به ثبت بردارهای سرعت پرداخته شد. مشاهده می‌شود که در این حجم آب مقدار گرد ۴۰ میلی‌گرم مناسب‌ترین بردارها را ارایه خواهد داد. از آنجا که حجم آب مبدل و گرم کن در مدار خنک کاری بازسازی شده از موتور EF7، ۸,۸ لیتر است، مقدار گرد مورد نیاز برای استفاده در میز آزمایشی ۱,۵۴ گرم است.

## ۲-۴- پردازش تصویر و استخراج بردارهای سرعت

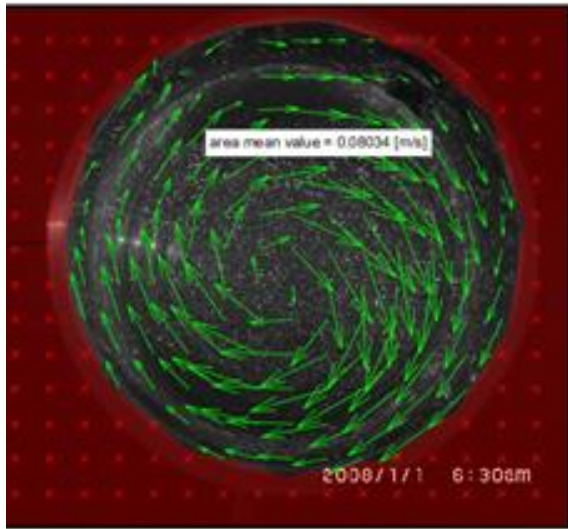
تعداد عکس تهیه شده از یک فیلم ۸ ثانیه‌ای که با سرعت ۱۲۰۰ تصویر در ثانیه از حرکت سیال گرفته شده ۹۶۰۰ عدد است. از آنجا که طول دهانه پرده ثابت<sup>۱</sup> ۷۰ میلی‌متر است اگر ذره با سرعت ۷ متر در ثانیه از مقابل پرده ثابت عبور کند (عددی که در تحلیل‌های شبیه‌سازی کارهای قبل به ثبت رسیده است) تنها ۰,۰۱ ثانیه دیده می‌شود.

از طرفی فاصله زمانی هر یک از عکس‌های ثبت شده ۰,۰۰۰۸۳ ثانیه است. در صورتی که این دو عدد برهم تقسیم شوند تعداد دیده شدن ذره با چنین سرعتی ۱۲ بار خواهد بود. این عدد برای ذره‌ای با سرعت ۱ متر در ثانیه، ۸۴ بار است و بهمین ترتیب هر چه ذره با سرعت کمتری از مقابل پرده ثابت عبور کند برداشت تصاویر برای تحلیل بیشتر خواهد بود.

اگر هر دو تصویر را مبنای استخراج بردار قرار دهیم تصاویر برداشت شده در لحظات مختلف از ثبت عکس‌ها، کاملاً برهم منطبق نیستند که خبر از رفتار نوسانی سیال در حین عبور از مجاری مختلف بستر دارد.

<sup>1</sup> Diaphragm

بردارهای چرخشی استخراج شده از سیال در حال چرخش را نشان می‌دهد.

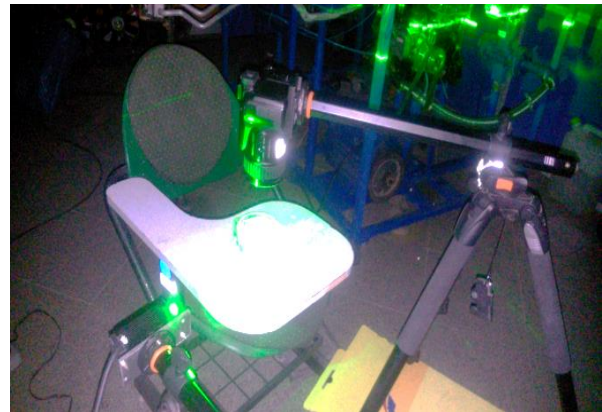


شکل ۱۰: استخراج بردارهای چرخشی از حرکت سیال

دوربین بر روی پایه در زاویه مناسب برای تصویربرداری به گونه‌ای تنظیم می‌شود که عمود بر سطح صفحه نورانی پرتو نور قرار گرفته و به ثبت حرکت ذرات در لحظات مختلف بپردازد. برای تنظیم پایه‌های دوربین و پرتو نور از حباب تنظیم حالت تراز استفاده می‌نماییم. یک سوال اساسی در اینجا مطرح است و آن اینکه اگر ذره در حال عبور از شیت پرتو نور در کسری از ثانیه از صفحه نورانی خارج شود، چگونه می‌توان در لحظه‌ای بعد به تعقیب ذره پرداخت و بردار سرعتی را متناسب با این حرکت استخراج نمود. پاسخ به این سؤال را تنها می‌توان با تغییر در سرعت ثبت عکس از حرکت سیال به انجام رسانید. سرعت نهایی عکس برداری توسط دوربین ۶۰ تصویر در ثانیه است و تصویربرداری را می‌توان با سرعت‌های متفاوتی از جمله ۳۰-۳۰۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ تصویر در ثانیه انجام داد. بر اساس قطر پرده ثابت دوربین، می‌توان محاسباتی برای دستیابی به محدوده مناسب سرعت انجام عکس برداری و یا تصویربرداری انجام داد. این محاسبات نشان می‌دهد در صورتی که سرعت سیال تا ۱۸۷ سانتی‌متر در ثانیه باشد انجام عکس برداری می‌تواند حرکت سیال را در صفحه پرتو نور ثبت کرده و بردارهای مناسبی ارائه دهد. اما اگر سرعت تقریبی سیال، بیش از این مقدار باشد، تنها انجام تصویربرداری قادر به ثبت حرکات نوسانی و پر تغییر ذرات سیال در آن لحظات خواهد بود. سرعت نهایی مایع خنک کار ثبت شده در مقالات ۱۹۰ سانتی‌متر در ثانیه گزارش شده است، و اگر این عدد مبنای یک محاسبه سرانگشتی قرار گیرد متوجه می‌شویم با جابجا شدن ۱۹۰ سانتی‌متر حرکت ذره در هر ثانیه، با سرعت نهایی عکس برداری دوربین (۶۰ تصویر در ثانیه)، سرعت ذره تنها یکبار ثبت می‌شود.

بدین ترتیب سرعت خطی سیال در میانه لیوان ( $r = 0.013 \text{ m}$ ) از روش تحلیل مقدار تقریبی  $v = 0.08164 \text{ m/s}$  تعیین می‌شود. حال درست زمانی که که قاشق پس از ۱۰ ثانیه از سیال خارج می‌شود، دکمه پرده متحرک دوربین را زده و به ثبت ۶۰ عدد عکس در ثانیه پرداخته شده است.

نحوه انجام کار در شکل (۹) نمایش داده شده است. عکس‌ها برای تحلیل به نرم‌افزار piv toolbox وارد شدند و پس از استخراج بردارها مشاهده می‌شود که بین نتایج استخراج شده از آزمایش با آنچه در اندازه سرعت به روش تحلیل پیش بینی شده بود همخوانی وجود دارد. انجام این کار می‌تواند ضامنی برای انجام کار نهایی در مورد مجاری بستار است.



شکل ۹: نحوه قرارگیری اجزا در ثبت چرخش سیال

نکته خاصی که در این مرحله از آزمایش وجود دارد، مقدار تأثیر شدیدی است که تحلیل نتایج از شرایط انجام آزمایش می‌پذیرد. به این معنی که هرگونه نور اضافه در زمان ثبت داده‌ها می‌تواند نرم‌افزار را به اشتباه بیندازد و سبب ارایه بردارهایی کاملاً بی‌ربط در ناحیه مورد بررسی شود. یکی از این موارد انعکاس نور پرتو نور در برخورد با جداره لیوان است. زمانیکه تصاویر بدون توجه به چنین مواردی تحلیل می‌شود، بردارهای سرعت هرگز چرخشی نیستند و بردارهای تولیدی در جهت نورهای انعکاسی موجود در فضا، قرار می‌گیرند.

شاید به عنوان یک راه حل استفاده از فتوشاپ برای ویرایش تصاویر و حذف نورهای انعکاسی مزاحم در تصاویر قبل از تحلیل درست به نظر برسد، اما این راه حل مسأله نیست. تنهاترین و آخرین راه، تغییر در شرایط آزمایشگاهی برای دسترسی به نتایج دلخواه است.

به این منظور بر روی یک کاغذ رنگی به رنگ تیره مات دایره‌ای به قطر دهانه لیوان بریده شده و این کاغذ را بر روی دهانه لیوان در حالتی قرار می‌دهیم که اشعه پرتو نور از زیر کاغذ به سیال تابانده شده و برداشت عکس از حرکت سیال از سمت بالا صورت گیرد.

به این ترتیب با تاریک کردن فضا دوربین به ثبت محل ذرات نورانی در برخورد با اشعه پرتو نور پرداخته و نورهای انعکاسی مزاحم بدلیل وجود صفحه حایل اجازه ورود به دهانه پرده ثابت را ندارند. شکل (۱۰)

طول، پهنا، و ارتفاع الگو بترتیب ۴۰۰، ۱۵۵ و ۶۵ میلی‌متر است. برای انجام تحلیل از فرایند تغییرات سرعت در راهگاه‌های جریان، طول بستار شفاف به ۴ قسمت در مرز استوانه‌ها تقسیم بندی شده و اندازه‌گیری در ۲۱ ناحیه از حرکت سیال صورت پذیرفته است.

دستگاه مختصات XYZ در گوشه پایین سمت راست در استوانه اول، بگونه‌ای نصب شده است که در جهت جریان ورودی به آن ایستاده باشیم. محور X امتداد جریان، محور Y راستای عمود بر امتداد جریان در صفحه افقی بستار و محور Z جهت عمود بر دو راستای یادشده برای تحلیل استفاده شده است.

لازم به یادآوری است ذره سیال حین حرکت در مجاری دارای نوسانات سرعت بوده و در کسری از ثانیه ممکن است مسیر حرکت خود را در هریک از امتدادهای یاد شده تغییر دهد. برای ثبت این گونه تغییرات به گونه‌ای که ثبت مقادیر سرعت در محدوده دقت مسأله باشد و بخشی از حرکت ذره در حین عبور حذف نشود سرعت تصویربرداری در بالاترین قابلیت دوربین انتخاب شده و انجام تحلیل در نرم‌افزار متلب براساس همبستگی نقاط در ۳ جهت مختلف استفاده شده است. انجام چنین عملی به سوال اساسی در مورد حرکت سیال در مورد امکان خارج شدن ذره از صفحه پرتو نور در حین عبور از مقابل دوربین پاسخ خواهد داد.

هر بستار دارای ۴ استوانه عمودی دارای قطر مشابه ۱۳ میلی‌متر (محل ساق دریچه در بستار) و یک استوانه عمودی با قطر بزرگتر (محل قرار گیری شمع جرقه) با قطر ۱۶ میلی‌متر است. شماره بندی استوانه‌های ساق دریچه از گوشه پایین سمت راست شروع شده و به گوشه بالا سمت چپ خاتمه می‌یابد. هر استوانه دارای دو دریچه ورودی و دو دریچه خروجی است.

به طوری که در استوانه ۱ نواحی مربوطه مطابق با استوانه دریچه ورودی i11 و i12، همچنین e11 و e12 برای دریچه‌های دود نامگذاری شده اند. این موضوع در هر استوانه به منظور نامگذاری ناحیه مربوطه بین دریچه و شمع و یا ناحیه پشت دریچه در اندازه‌گیری‌های ابتدایی تکرار شده است. فاصله بین استوانه‌های مجاور ساق دریچه در هر استوانه ۴۰ میلی‌متر و با استوانه ساق دریچه استوانه مجاور ۶۰ میلی‌متر است. کمترین فاصله بین راهگاه ساق دریچه و استوانه محل نشستن شمع (پل ارتباطی) ۱۳٫۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است.

در شکل (۱۱) موقعیت‌های اندازه‌گیری سرعت نشان داده شده است. برای ثبت این گونه تغییرات به گونه‌ای که ثبت مقادیر سرعت در محدوده دقت مسأله باشد و بخشی از حرکت ذره در حین عبور حذف نشود سرعت تصویربرداری در بالاترین قابلیت دوربین انتخاب شده و انجام تحلیل در نرم‌افزار متلب براساس همبستگی نقاط در ۳ جهت مختلف استفاده شده است.

انجام چنین عملی به سوال اساسی در مورد حرکت سیال در مورد امکان خارج شدن ذره از صفحه پرتو نور در حین عبور از مقابل دوربین پاسخ خواهد داد. هر استوانه دارای ۴ استوانه عمودی با قطر مشابه (محل

زیرا قطر دهانه پرده ثابت ۶ سانتی‌متر است و اگر ذره با چنین سرعتی از مقابل پرده ثابت عبور کند تنها یکبار دیده می‌شود و ثبت بعدی در مورد ذره‌ای دیگر بی ارتباط با ذره اول اتفاق خواهد افتاد.

بنابراین بردار سرعتی نرم‌افزار، برداری است که از حرکت دو ذره متفاوت نتیجه گیری شده است و قابل استناد نیست.

بنابراین، از آنجا که استفاده از آخرین سرعت عکس برداری قادر نیست به ثبت تغییرات لحظه‌ای سرعت ذرات پردازد ناگزیر به انجام تصویربرداری با سرعت بالا هستیم. همانطور که بیان شد، چهار گزینه برای انتخاب پیش رو داریم: تصویربرداری با سرعت ۳۰-۳۰۰، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۱۲۰۰ تصویر در ثانیه. انتخاب سرعت ۱۲۰۰ می‌تواند فواصل ثبت سرعت را کاهش داده و ما را به نتایج دقیق تری از حرکت سیال برساند.

در این حالت در هر ۱۹۰/۱۲۰۰ از طول پیمایش پرده ثابت، ثبت سرعت خواهیم داشت و این برای هر ذره یعنی تقریباً ۳۸ بار. براین اساس می‌توان از ثبت حرکت یک ذره و تعقیب آن در حین عبور از مقابل دهانه پرده ثابت مطمئن بود و چنین سرعتی را مبنای تحلیل در ثبت مقادیر خروجی از آزمایش قرار داد.

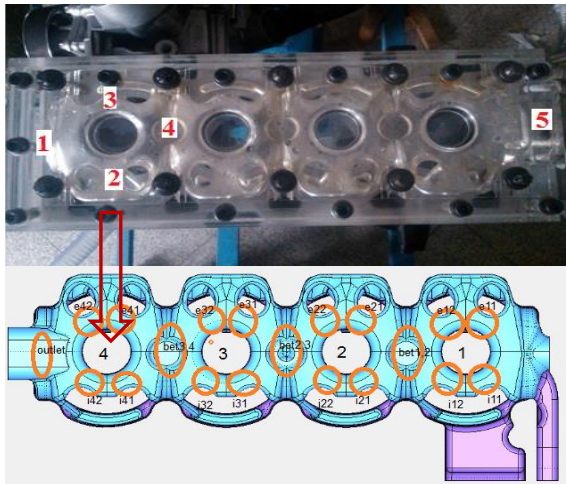
پس از انجام تصویربرداری فیلم مورد نظر باید برای ورود به نرم‌افزار به تعداد تصاویر ساخته شده آن تبدیل شود. به این منظور نرم‌افزار vedio match بکار گرفته شده است. دقت خاصی که در این مرحله از کار باید لحاظ شود اینکه به دلیل قابلیت نهایی ۹۶۰۰ عکسی نرم‌افزار در تبدیل فیلم به عکس، با سرعت دوربین ۱۲۰۰ تصور در ثانیه نهایتاً ۸ ثانیه مجاز به تصویربرداری خواهیم بود. تصویربرداری بیش از این زمان فاصله تصاویر را افزایش داده و از دقت مسأله در دسترسی به کمیت و کیفیت بردارها خواهد کاست.

## ۲-۴-۱- نرم‌افزار پردازش تصویر

به منظور تبدیل داده‌های آزمایشگاهی به بردارهای سرعت دارای جهت و اندازه از نرم‌افزار piv toolbox استفاده شده است. این نرم‌افزار مستقیماً بر روی Matlab قابل نصب بوده و به عنوان یک toolbox در آن به اجرا در خواهد آمد. کار با نرم‌افزار به گونه‌ای است که حداقل دو عکس متوالی را مستقیماً از دوربین با همان قالب ضبط شده، دریافت می‌کند و بردار سرعتی را معادل با اختلاف زمانی لحظات ثبت تصاویرهای متوالی ارائه می‌دهد.

## ۲-۵- اندازه‌گیری سرعت جریان

میدان جریان سیال در بستار در ۲ نرخ شار جریان متفاوت ۱۹٫۹ و ۲۴٫۲ لیتر بر دقیقه اندازه‌گیری شده است. برای دسترسی به این مقادیر مقدار خروجی فرکانس در مبدل باید بر روی اعداد ۱۶٫۶ و ۲۵ هرتز باشد. قطر پولی ۱ به ۲٫۵ برابر قطر چرخ‌تسمه در موتور برقی بوده و بمنظور دسترسی به دور نهایی موتور در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۱: نام گذاری موقعیت‌های اندازه‌گیری

### ۳- نتایج عددی شبیه‌سازی و تجربی تصویر سرعت ذره در سرعت ۳۷۵۰ د.د.د.

مطابق با آنچه که در نمای شماتیک بستار (شکل ۱۱) نشان داده شده در پیچه‌های ورودی با حرف i و در پیچه‌های خروجی با حرف e نشان داده شده اند. مقادیر سرعت برحسب کمیت رانج متر بر ثانیه به ثبت رسیده و برای تعیین نقاط جدایش جریان از سطح در ساق در پیچه و یا نشیمنگاه، زاویه دواپر از  $\alpha = 0^\circ$  از سمت چپ ورودی جریان اندازه‌گیری شده و برای انتخابی در ثبت نتایج CCW است. ابتدا به تحلیل نتایج در دور ۲۵۰۰ د.د.د. پرداخته می‌شود:

مقدار آب مقطر لازم در مدار خنک‌کاری موتور در حالت واقعی ۶٫۶ لیتر است که در اینجا بدلیل استفاده از شارس‌نچ‌ها در مسیر جریان این مقدار به ۸٫۸ لیتر می‌رسد. مقدار گرد PVC استفاده شده در مدار برای استخراج بردارهای سرعت ۱٫۵۶ گرم بوده است.

همزمان با چرخش آب در مدار خنک‌کاری هواگیری از سامانه به طور کامل انجام شده که اینکار از طریق اعمال فشار ایستایی ۱ بار بر روی مخزن فرعی در مدار است. وقتی فضای اتاق تاریک شد، صفحه پرتو نور بر هر یک از مقاطع مورد نظر در ارتفاع مشخص و یکسان تابانده شده، به طوری که از برخورد نور با ذرات بتوان حرکت ذرات را به صورت نقاطی نورانی در حال عبور از مسیر مورد نظر مشاهده کرد. حال دوربین را در تندترین سرعت تصویربرداری قرار داده و در جهتی عمود بر صفحه نورانی به انجام تصویربرداری پرداخته شده است. حداکثر زمان تصویربرداری ۸ ثانیه است تا بتوان در محدوده دقت آزمایش به ثبت تصاویر و نهایتاً استخراج بردارها دست یافت.

شکل (۱۲) اندازه‌گیری تجربی بردار سرعت و جهت بردارهای سرعت را در ناحیه بین استوانه ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود سرعت جریان مقدار میانگین ۰٫۱۵ متر بر ثانیه را با زاویه ۸۷ درجه نسبت به محور X را نشان می‌دهد.

ساق در پیچه در بستار) و ۱ استوانه عمودی با قطر متفاوت (محل قرار گیری شمع جرچه) در ناحیه بستار است.

قطر استوانه‌های مربوط به ساق در پیچه ۱۳ میلی‌متر و قطر استوانه‌های مربوط به محل قرارگیری شمع جرچه ۱۶ میلی‌متر است. شماره‌بندی استوانه‌های ساق در پیچه از گوشه پایین سمت راست شروع شده و به گوشه بالا سمت چپ خاتمه می‌یابد.

هر استوانه دارای دو در پیچه ورودی و دو در پیچه خروجی است. به طوری که در استوانه ۱ نواحی مربوطه مطابق با استوانه‌های i11 و i12، همچنین e11 و e12 نامگذاری شده اند. این موضوع در هر استوانه به منظور نامگذاری ناحیه مربوطه بین در پیچه و شمع و یا ناحیه پشت در پیچه در اندازه‌گیری‌های ابتدایی تکرار شده است. فاصله بین استوانه‌های مجاور ساق در پیچه در هر استوانه ۴۰ میلی‌متر و با استوانه ساق در پیچه استوانه مجاور ۶۰ میلی‌متر است.

کمترین فاصله بین راهگاه ساق در پیچه و استوانه محل نشستن شمع ۱۳٫۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. که این کمترین فاصله به پل ارتباطی معروف است. اندازه‌گیری‌ها در ۳ نرخ جریان ذکر شده در بخش اندازه‌گیری انجام شده است.

جریان از سمت بدنه در جهت محور Z به الگو وارد شده و پس از آن در جهت بردارهای X و Y و Z (و غالباً در جهت X) حرکت کرده و در انتهای الگو از آن خارج می‌شود.

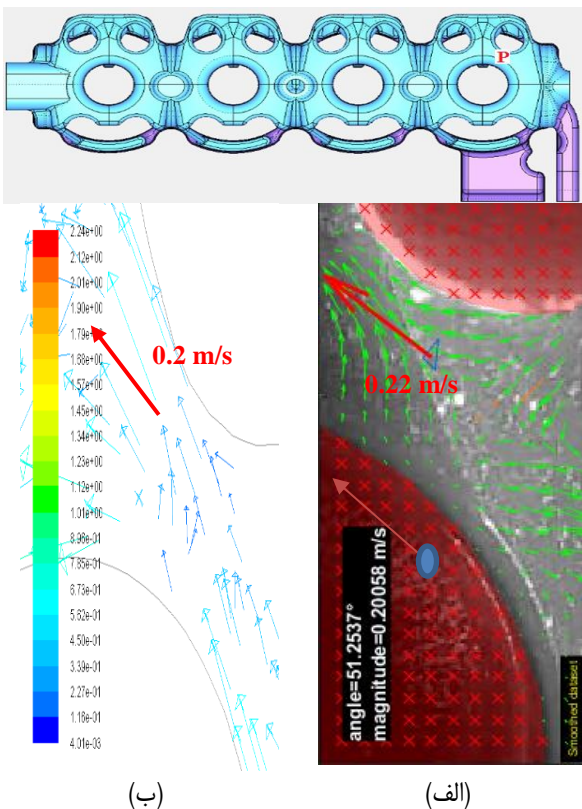
بجز ورودی اصلی، مقاطع ورودی جریان (مطابق با قطر راهگاه‌ها در واشر سیلیکونی به منظور پایش شار) در بخش فوقانی هریک از استوانه‌ها تعبیه شده است.

تعداد این راهگاه‌ها ۴ عدد برای هر استوانه و قطر آنها ۵ میلی‌متر در نواحی نزدیک به در پیچه‌ها برای ورود مایع از بدنه به بستار در نظر گرفته شده است. برای مشاهده حرکات سیال در ناحیه بین استوانه‌ها مختصات طولی ۱۰، ۱۱۰، ۲۰۰، ۲۹۰ و ۳۸۰ میلی‌متر برای تصویربرداری انتخاب شده است.

مقطع خروجی مستطیلی با سطح مقطع  $۵۰ \times ۸۰$  میلی‌متر مطابق با موتور EF7 ساخته شده است. از آنجا که ممکن است توانایی دسترسی به برخی مقاطع بدلیل محدودیت جانمایی پرتو نور و دوربین وجود نداشته باشد، برای مشاهده و اندازه‌گیری سرعت سیال، مقاطع مطابق شکل (۱۱) انتخاب شده و سعی شده است شرایط اندازه‌گیری سرعت در این نقاط تا حد ممکن فراهم شود.

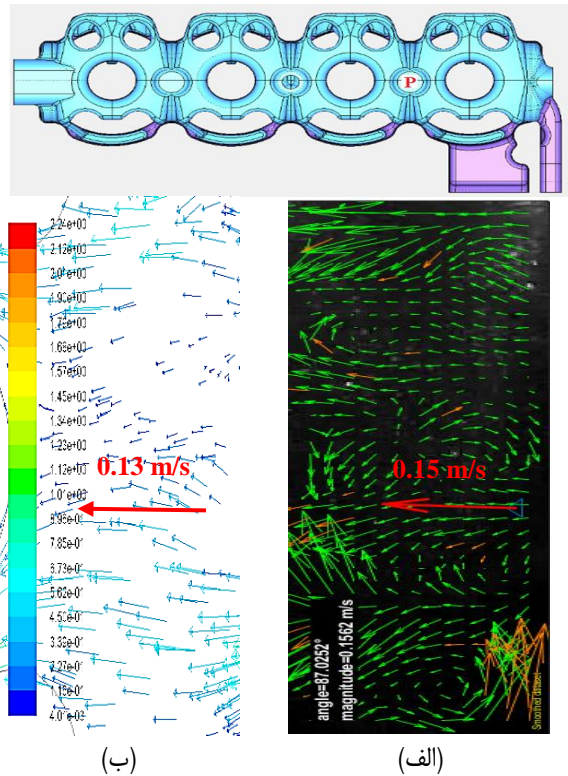
- ۱- ناحیه ورودی اصلی به بستار پس از تلمبه آب در واحد پودمان روغن
- ۲- نواحی اطراف در پیچه‌های ورودی در هر استوانه
- ۳- نواحی اطراف در پیچه‌های خروجی در هر استوانه
- ۴- ناحیه بین استوانه‌ها از یک استوانه به استوانه دیگر
- ۵- ناحیه خروجی اصلی از بستار به سمت دمابان

همانطور که دیده می‌شود سرعت جریان مقدار میانگین ۰٫۶۷ متر بر ثانیه را با زاویه ۹۳ درجه نسبت به محور x را نشان می‌دهد. مقدار سرعت ورودی عددی ۰٫۷۳ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. در شکل (۱۴) نتیجه شبیه‌سازی جریان را در ناحیه بین دریچه هوای اول و شمع (نقطه e11 در شکل ۱۱) و شمع را که با نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است را نشان می‌دهد. از لحاظ شکل بردار سرعت و اندازه آن تقریباً یکسان به نظر می‌رسند. سرعت تجربی در نقطه نشان داده شده در مقدار ۰٫۲ متر بر ثانیه و مقدار عددی ۰٫۲۲ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد.



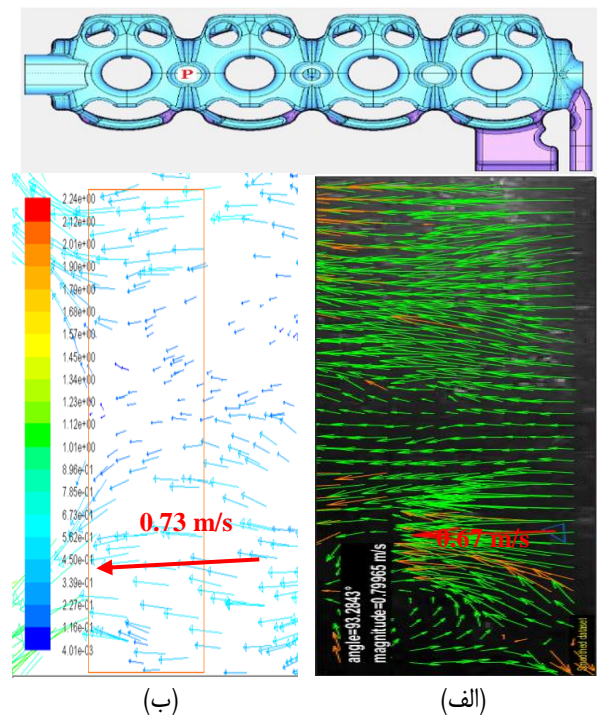
شکل ۱۴: نتایج عددی و آزمایشگاهی بردار سرعت در ناحیه e11

شکل (۱۵) اندازه‌گیری تجربی بردار سرعت و جهت بردارهای سرعت را در ناحیه بین دریچه دود اول و شمع (نقطه e12 در شکل ۱۱) نشان می‌دهد. در این ناحیه از جریان بعلت همگرایی مقطع با افزایش مقدار سرعت در ناحیه میانی پل ارتباطی سرعت ۰٫۴۵ متر بر ثانیه با زاویه ۱۳۳٫۵ درجه نسبت به محور x را نشان می‌دهد. شکل (۱۶) اندازه‌گیری تجربی بردار سرعت و جهت بردارهای سرعت را در ناحیه بین دریچه دود اول و شمع (نقطه e22 در شکل ۱۱) نشان می‌دهد. در این ناحیه از جریان بعلت همگرایی مقطع با افزایش مقدار سرعت در ناحیه میانی پل ارتباطی سرعت ۰٫۳۹۸ متر بر ثانیه با زاویه ۸۹٫۵ درجه نسبت به محور x را نشان می‌دهد. الگوی منظم جریان در ناحیه پس از گلوگاه حفظ شده است.

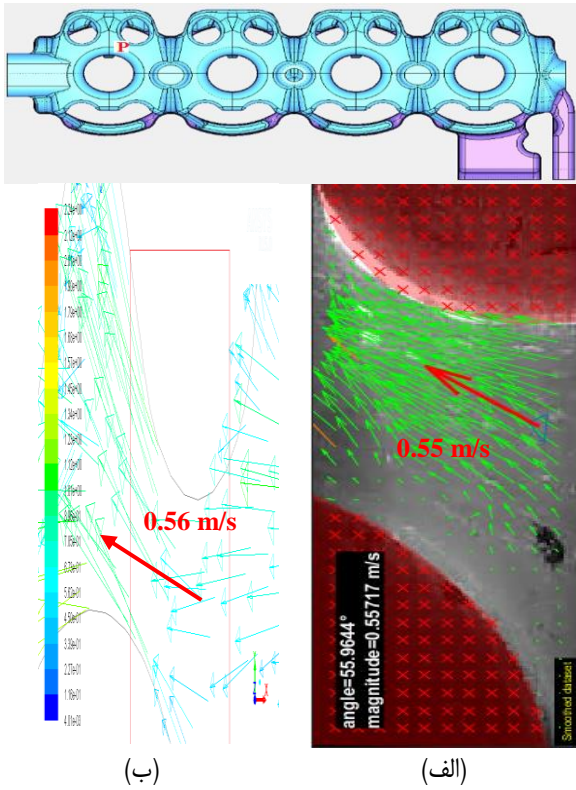


شکل ۱۲: نتایج عددی و آزمایشگاهی بردار سرعت در ناحیه بین استوانه ۱ و ۲

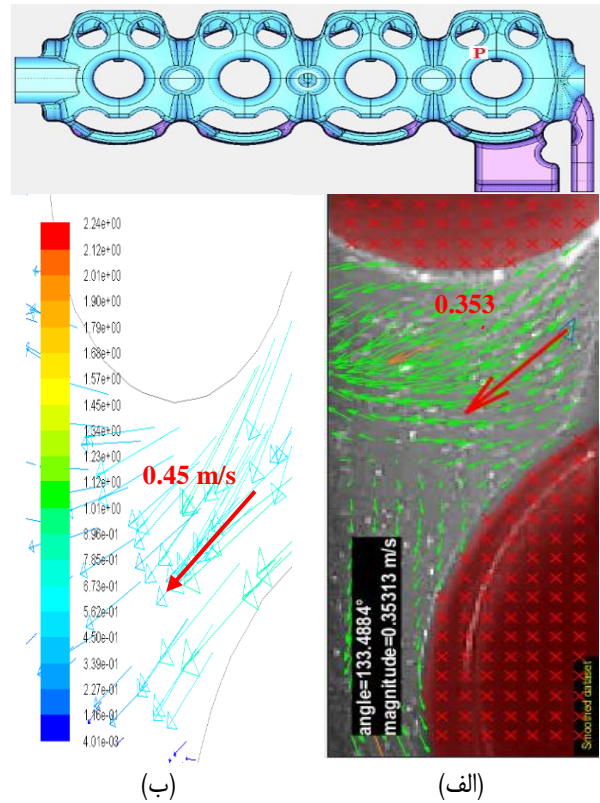
مقدار سرعت ورودی عددی ۰٫۱۳ متر بر ثانیه در ناحیه ورودی، جریان در اثر برخورد با نشیمنگاه شمع، انحراف یافته و بخشی از انرژی حاصل از آشفته‌گی جریان در این ناحیه مستهلک شده است. شکل (۱۳) اندازه‌گیری تجربی بردار سرعت و جهت بردارهای سرعت را در ناحیه بین استوانه ۳ و ۴ را نشان می‌دهد.



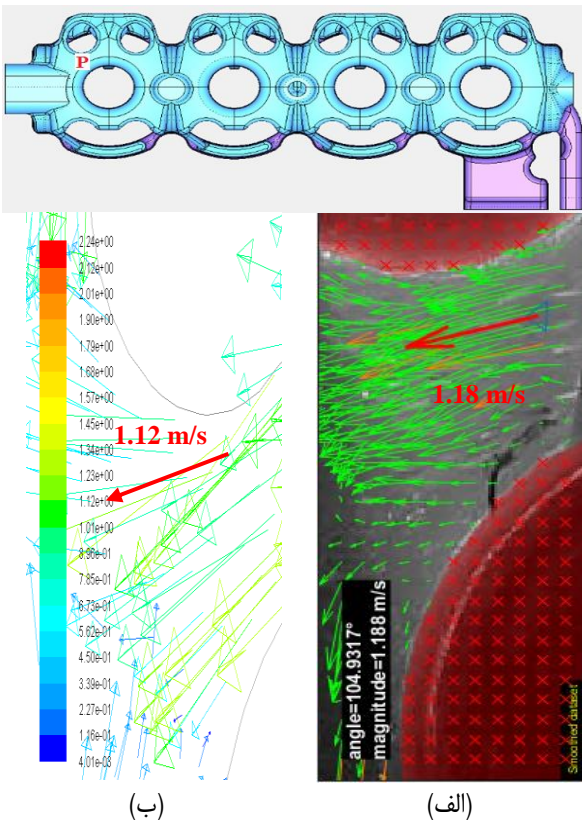
شکل ۱۳: نتایج عددی و آزمایشگاهی بردار سرعت در ناحیه بین استوانه ۳ و ۴



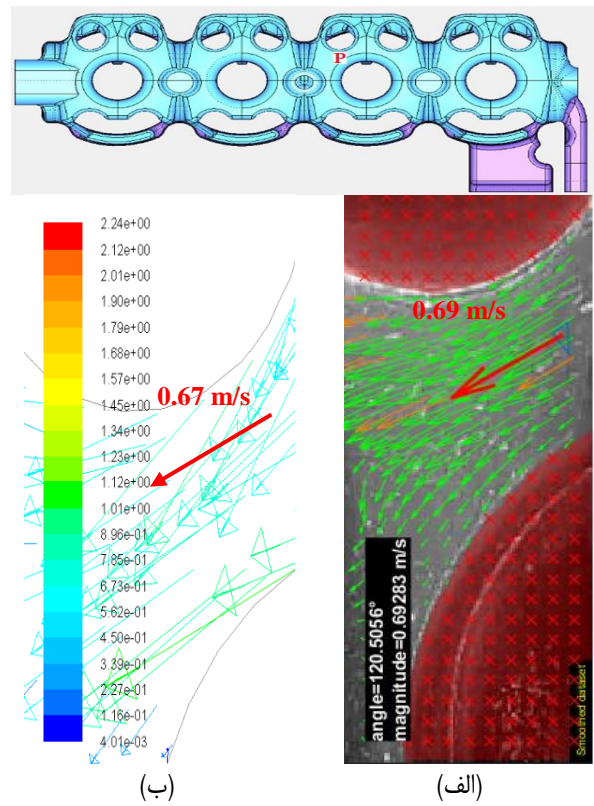
شکل ۱۷: نتایج عددی و آزمایشگاهی بردار سرعت در ناحیه e41



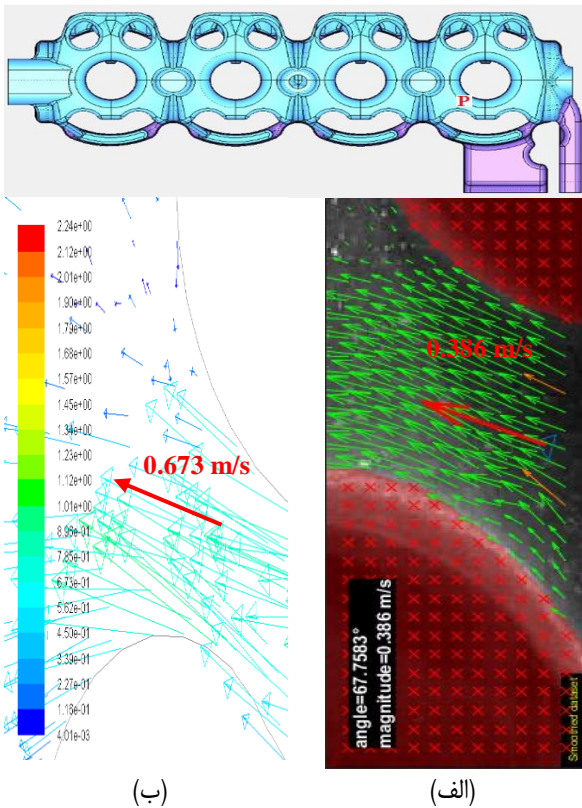
شکل ۱۵: نتایج عددی و آزمایشگاهی بردار سرعت در ناحیه e12



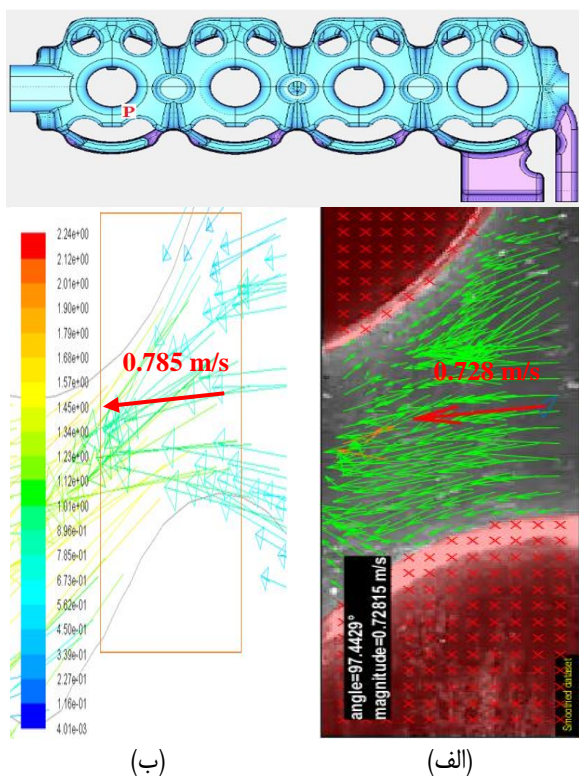
شکل ۱۸: نتایج عددی و آزمایشگاهی بردار سرعت در ناحیه e42



شکل ۱۶: نتایج عددی و آزمایشگاهی بردار سرعت در ناحیه e22

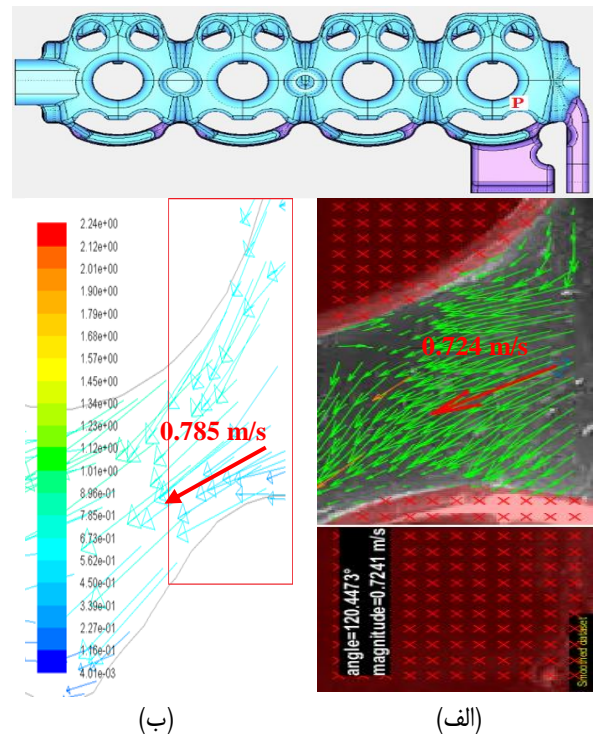


شکل ۲۰: نتایج عددی و آزمایشگاهی بردار سرعت در ناحیه i12



شکل ۲۱: نتایج عددی و آزمایشگاهی بردار سرعت در ناحیه i41

در شکل (۱۹) نتیجه شبیه‌سازی جریان را در ناحیه بین دریچه هوای اول و شمع (نقطه i11 در شکل ۱۱) و شمع را که با نرم‌افزار فلونت انجام شده است را نشان می‌دهد. از لحاظ شکل بردار سرعت و اندازه آن تقریباً یکسان به نظر می‌رسند. سرعت تجربی در نقطه نشان داده شده در شکل (۸) مقدار ۰٫۷۲۴ متر بر ثانیه و در شکل (۹) مقدار عددی ۰٫۲۷۳ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. مقدار خطای عددی تقریباً ۱۰ درصد است.



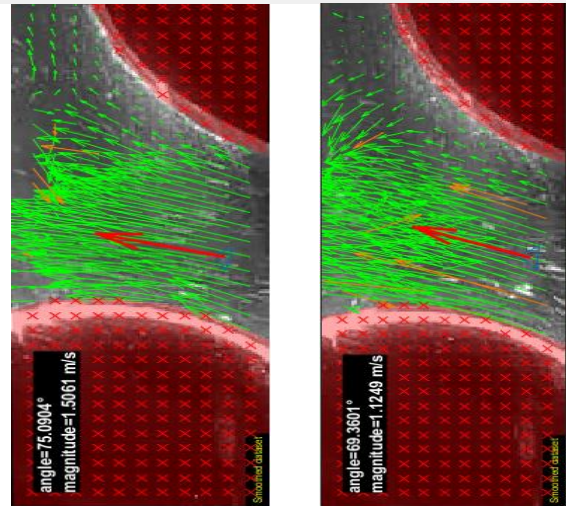
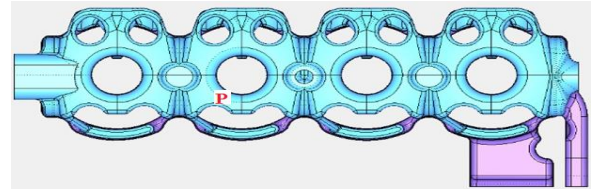
شکل ۱۹: نتایج عددی و آزمایشگاهی بردار سرعت در ناحیه i11

در شکل (۲۰) نتیجه شبیه‌سازی جریان را در ناحیه بین دریچه هوای اول و شمع (نقطه i12 در شکل ۱۱) و شمع را که با نرم‌افزار فلونت انجام شده است را نشان می‌دهد. از لحاظ شکل بردار سرعت و اندازه آن تقریباً یکسان به نظر می‌رسند. سرعت تجربی در نقطه نشان داده شده در شکل (۸) مقدار ۰٫۲۳۳ متر بر ثانیه و در شکل (۹) مقدار عددی ۰٫۷۸۵ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. مقدار خطای عددی تقریباً ۱۰ درصد است.

در شکل (۲۱) نتیجه شبیه‌سازی جریان را در ناحیه بین دریچه هوای اول و شمع (نقطه i41 در شکل ۱۱) و شمع را که با نرم‌افزار فلونت انجام شده است را نشان می‌دهد. از لحاظ شکل بردار سرعت و اندازه آن تقریباً یکسان به نظر می‌رسند. سرعت تجربی در نقطه نشان داده شده در شکل (۸) مقدار ۰٫۲۳۳ متر بر ثانیه و در شکل (۹) مقدار عددی ۰٫۲۷۳ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. مقدار خطای عددی تقریباً ۱۰ درصد است.

#### ۴- تکرار پذیری آزمون‌های تجربی

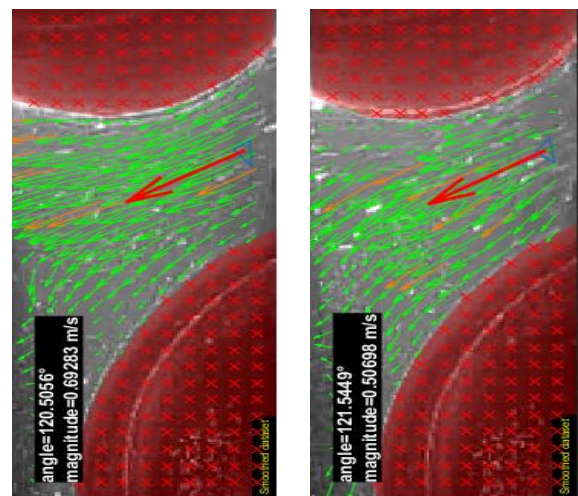
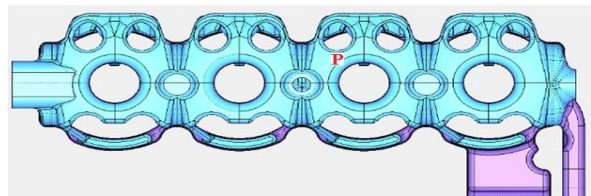
به منظور تصدیق نتایج بدست آمده در بخش آزمایشگاهی، این نتایج در دو ناحیه در دور ۳۷۵۰ د.د.د. ده بار تکرار شده تا صحت یافته‌ها مورد تأیید قرار گیرد که در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) نشان داده شده است.



(ب)

(الف)

شکل ۲۲: آزمون تکرار پذیری در بخش آزمایشگاهی i32



(ب)

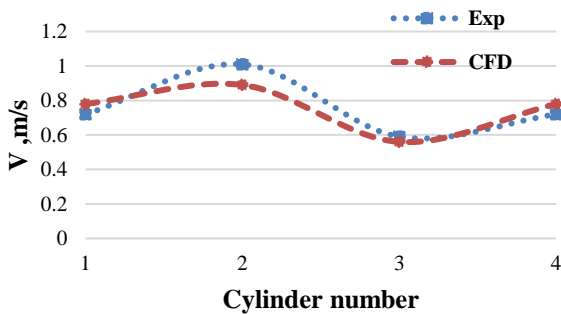
(الف)

شکل ۲۳: آزمون تکرارپذیری در بخش آزمایشگاهی e22

#### ۴-۱- دور ۳۷۵۰ د.د.د. دریچه گاز اول تا چهارم

در شکل ۲۴ مقدار بردار سرعت تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی در نقاط i11 و i21 و i31 و i41 (مطابق شکل ۱۱) در دور ۳۷۵۰ د.د.د. باهم مقایسه شده است. اختلاف جزئی در استوانه شماره ۲ در نقطه i21 وجود دارد که علت آن را می‌توان ماهیت سه بعدی جریان در قسمت ورودی از بدنه به بستر دانست. مطابق شکل در دریچه گاز اول پس از استوانه دوم کاهش سرعت در هر دو نمودار دیده می‌شود.

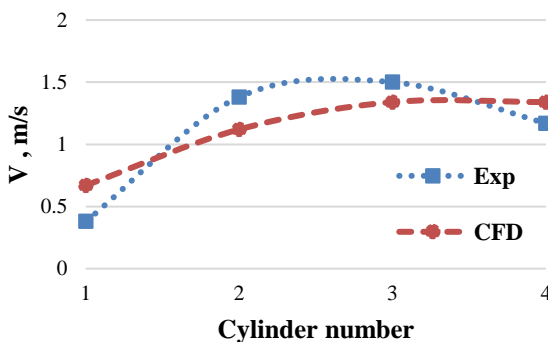
Velocity magnitude



شکل ۲۴: مقایسه سرعت عددی و آزمایشگاهی در نقطه i11 و i21 و i31 و i41 در سرعت ۳۷۵۰ د.د.د.

در شکل ۲۵ مقدار بردار سرعت تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی در نقاط i12 و i22 و i32 و i42 (مطابق شکل ۱۱) در دور ۳۷۵۰ د.د.د. باهم مقایسه شده است. اختلاف در استوانه شماره ۱ تا ۴ وجود دارد که علت آن در i12 را می‌توان ماهیت سه بعدی جریان دانست. در استوانه ۲ تا ۴ اثر شدت آشفتگی جریان است زیرا در دور ۲۵۰۰ د.د.د. این اختلاف سرعت مشاهده نشد.

Velocity magnitude



شکل ۲۵: مقایسه سرعت عددی و آزمایشگاهی در نقطه i12 و i22 و i32 و i42 در سرعت ۳۷۵۰ د.د.د.

#### ۴-۲- دور ۳۷۵۰ د.د.د. دریچه دود اول تا چهارم

در شکل ۲۶ مقدار بردار سرعت تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی در نقاط e11 و e21 و e31 و e41 (مطابق شکل ۱۱) در دور ۳۷۵۰ د.د.د.

شده است. همانطور که دیده می‌شود مقایسه نتایج محدوده کمیت سرعت سیال را در هریک از نواحی به خوبی تأیید می‌کند. عوامل ناشی از این اختلاف در هر یک از نواحی مربوطه بحث شده است. نتایج زیر بدست آمد: در نواحی بین دریچه e11 و نشیمنگاه شمع افت سرعت در ناحیه گلوگاه دیده می‌شود و این افت در هر دو بخش آزمایشگاهی و عددی قابل تشخیص است. در بررسی کلیه راهگاه‌های آب در بستار دیده می‌شود که با نزدیک شدن به دریچه‌های انتهایی از بستار جریان روند افزایشی به خود گرفته است.

این موضوع در کلیه دوره‌های موتور به اثبات رسیده است. از آنجا که سیال خنک‌کاری در برداشت گرمایی از دریچه‌های استوانه اول و دوم و نواحی نزدیک با شمع، مقداری حرارت جذب نموده، برای برداشت گرمایی از دریچه‌های انتهایی بستار سیال لازم است از سرعت تندیتری برخوردار باشد و این موضوع خارج از انتظار نیست.

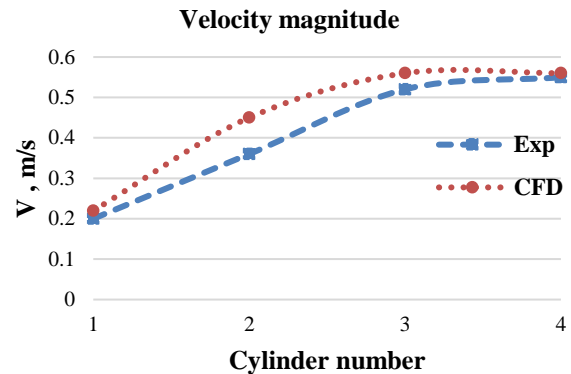
### تشکر و قدردانی

بدینوسیله نویسندگان مقاله مراتب قدردانی و تشکر خود را از مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو (ایکو) بعمل می‌آورد.

### مراجع و منابع

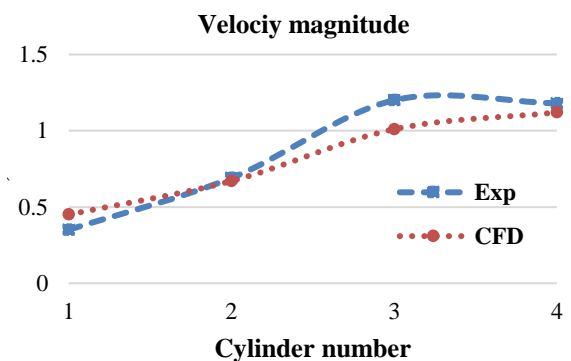
- [1] Hong, K. L., Brasmer, S., The use of flow visualization and computational fluid mechanics in cylinder head cooling jacket development, SAE Technical Paper 891897, 1989.
- [2] Liu, C. H., Vafidis, C. J., Whitelaw, H., Margary, R., Flow in the coolant passages of an internal combustion engine cylinder head, Journal of experiments fluid, Vol. 10, Issue. 1, pp. 50-54, 1990.
- [3] Sandford, M. H., Postlethwaite, I., Engine coolant flow simulation - A correlation study, SAE Technical Paper 930068, 1993.
- [4] Davis, G., Christ, R., A comparison of engine coolant in an accelerated heavy duty engine cavitation, SAE Technical Paper 960883, 1996.
- [5] Fang, G., Guoqi, C., An experimental study on the coolant flow field in the water jacket of a diesel engine cylinder Head with LDV technology, Automotive Engineering, Vol.32, No.8, 2010.
- [6] Zhang, Z., Ma, H. Jin, C., Xue, C. and Huang, Y., Application of PIV measurements and snapshot POD analysis in a cylinder head of diesel engine, Journal of Thermal Science Vol. 24, No. 2, pp. 179-184, 2015.
- [7] Zhang, Z., Ma, H. Jin, C., Xue, C. and Huang, Y., Application of PIV measurements and snapshot POD analysis in a cylinder head of diesel engine, ASME 2017 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, Seattle, Washington, USA, October 15-18, 2017.
- [8] Y. Aoyagi, Y. Takenaka, S. Niino, A. Watanable and I.joko, SAE Technical Paper 880109,(1988).
- [9] K. L. Hong and S. Brasmer, SAE Technical Paper 891897, (1989).

د.د.د. باهم مقایسه شده است. بیشترین اختلاف در استوانه شماره ۲ در نقطه e21 وجود دارد که علت آن را می‌توان ماهیت سه بعدی جریان در قسمت ورودی از بدنه به بستار دانست. هرچه از استوانه اول به طرف استوانه چهارم حرکت کنیم سرعت جریان در دریچه‌ها روند افزایشی دارد.



شکل ۲۶: مقایسه سرعت عددی و آزمایشگاهی در نقطه e11 و e21 و e31 و e41 در سرعت ۳۷۵۰ د.د.د.

در شکل ۲۷ مقدار بردار سرعت تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی در نقاط e12 و e22 و e32 و e42 مطابق شکل (۱۱)، در دور ۳۷۵۰ د.د.د. باهم مقایسه شده است. بیشترین اختلاف در استوانه شماره ۳ در نقطه e32 وجود دارد که علت آن را می‌توان ماهیت سه بعدی جریان در قسمت ورودی از بدنه به بستار دانست.



شکل ۲۷: مقایسه سرعت عددی و آزمایشگاهی در نقطه e12 و e22 و e32 و e42 در سرعت ۳۷۵۰ د.د.د.

### ۵- نتایج و بحث

در این مقاله با استفاده از روش تصویر سرعت ذره به تعیین سرعت سیال در بستار شفاف موتور EF7 پرداخته شده است. این اندازه‌گیری در دور ۳۷۵۰ د.د.د. انجام شده است. برای تأیید نتایج بدست آمده در بخش آزمایشگاه نتایج در چندین ناحیه تکرار شده است.

در پایان نتایج بدست آمده از بخش آزمایشگاه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار فلوئنت با اعمال شرایط آزمایشگاهی، مقایسه

- [16] D. Chartrain, A. M. Doisy, M. Guilbaud and J.P.Bonnet, 1999. Experimental investigation of coolant flow in a simplified reciprocating engine cylinder head.
- [17] Cenedese, A., Romano, G. P. and Di Felice, F. 1991. Experimental testing of Taylor's hypothesis by LDA in highly turbulent flow. *Experiments in Fluids*. 11(6): 351-358.
- [18] Gu Fang, Cui Guoqi, An Experimental Study on the Coolant Flow Field in the Water Jacket of a Diesel Engine Cylinder Head with LDV Technology, *Automotive Engineering*, 2010(Vol.32)No.8
- [19] Favre, A. J. 1965. Review on space-time correlations in turbulent fluids (Space-time correlation of turbulent flow) examining velocity and wall pressure in incompressible and compressible flow. *ASME. Trans. J. appl. Mech.* 32, 241
- [10] M. H. Sandford and I. Postlethwaite I., SAE Technical Paper 910068, 1993
- [11] A. Colleoc, Mellat and J. M. Boyer, Note Technique 1096/93/1847, 4<sup>th</sup> AACHEN Colloquium Automobile and Engine Technology, 1993.
- [12] Liu, C. H., Nouri, j. M. Whitelaw, j. H. Tse, D. G. N. 1989: particle velocities in a swirling, confined flow. *comb.Sci. Technol.* 68, 131-145
- [13] K. Watterson, W. N. Dawes, A. M. Savill and A. J. White, 3<sup>rd</sup> ERCOFTAC-IAHR Workshop on Refined Flow Modelling, Lison, Portugal, 1995'
- [14] G. D. Davis and R. J. Christ, SAE Technical Paper 960883, 1996.
- [15] W. S. Bederaux-Cayne, SAE Technical Paper 960881, 1996



# The Journal of Engine Research

Journal Homepage: [www.engineersearch.ir](http://www.engineersearch.ir)



## Numerical and Experimental Analysis of Flow Velocity in the Cylinder Head of Transparent Iranian National Engine with PIV Method

A. Abedi<sup>1</sup>, A. Mohammadi<sup>2</sup>, E. shirani<sup>4</sup>

<sup>1</sup> MSC of mechanical engineering, fooldad university of Esfahan, Esfahan, Iran, [asablueiran@yahoo.com](mailto:asablueiran@yahoo.com)

<sup>2</sup> Assistance Professor Mechanical Engineering Department, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran, [a\\_mohammadi@sru.ac.ir](mailto:a_mohammadi@sru.ac.ir)

<sup>3</sup> Professor, Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, [e\\_shirani@yahoo.com](mailto:e_shirani@yahoo.com)

<sup>4</sup>Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 24 January 2021

Accepted: 29 January 2021

#### Keywords:

EF7 engine

Transparent cylinder head

PIV

### ABSTRACT

The velocity of the fluid in every location of the water jacket has a direct relation with the rate of heat transfer. Approximately one-third of fuel heat release in an IC engine is lost to the environment by coolant flow. So, it is necessary to determine the velocity of coolant according to the rate of heat transfer. The water jacket of an engine has complex and non-transparent geometry and it is impossible to measure velocity in each location. In this paper, the velocity of coolant is measured in a transparent water-jacket of the EF7 engine with the PIV method. A volumetric flow rate of coolant is determined according to engine speed that two engine speeds considered in this research. In the PIV method with the dispersion of special submerged particles in coolant on a transparent water jacket and shining of the laser beam to particles, it is possible to track them. Then, with image processing, velocity vectors are carried out with the toolbox of the Matlab program. Extraction of results of the can is used for the study of fluid behavior. Besides experimental work, simulation with Fluent software was done for comparison between results.



© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.