طراحی سامانه سایه‌نگاری پرسرعت جهت محاسبات ابعادی و سرعت ذرات

آزاده کبریایی [۱] **حمیدرضا نصیری** [۲]

دانشکده مهندسی هوافضا **دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر**

دانشگاه صنعتی شریف **پردیس فنی دانشگاه تهران**

(تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۵)

چکیده

در این مقاله، طراحی و ساخت یک منبع نوری پرتوان پالسی جهت استفاده در تصویربرداری از ذرات به کمک روش سایه‌نگاری تشریح شده است. با توجه به کنتراست بالای تصاویر در روش سایه‌نگاری و عدم نیاز به منبع نور پرقدرت، از دیودهای نوری (LED) متعارف به جای لیزر در این منبع نوری استفاده شده. بنابراین، سامانه ساخته‌شده در بسیاری از مشخصات قابل مقایسه با نمونه‌های روش PIV می‌باشد. منبع نور پالسی ساخته‌شده حداقل پهنای پالس ۱۲۵ ns، فرکانس ۵۰۰ Hz و حداکثر جریان عبوری ۱۵ A را تامین می‌کند. جهت همزمانی پالس‌های نوری و زمان باز و بسته شدن شاتر دوربین، یک همزمان ساز نیز متناسب با مشخصات دوربین و منبع نور طراحی شده است. هم‌چنین، در این کار با استفاده از روش یک فریم- چند نور امکان جایگزینی دوربین‌های پرسرعت با نمونه‌های تجاری DSLR مورد مطالعه قرار گرفته است. تصاویر گرفته شده به کمک یک دوربین معمولی (DSLR) نشان می‌دهد که قطرات با سرعتی در حدود ۳۰-۲۰ m/s و اندازه‌ای در حدود ۲۰۰-۱۰۰ um قابل شناسایی هستند.

واژه‌های کلیدی: تصویربرداری، سایه‌نگاری، سرعت‌سنجی، منبع نور پالسی، دیود نوری

Design of High-Speed Shadowgraphy System for Sizing and Velocimetry of Particles

A. Kebriaee **H.R. Nasiri**

Aerospace Engineering Dep't. Electrical Engineering Dep't.
Sharif University of Technology Tehran University

(Received: 07/September/2016; Accepted: 25/December/2016)

ABSTRACT

In this paper, design and production of a high power pulsating illuminator for particles imaging in shadowgraph technique is presented. Based on high contrast of shadowgraph images and no need for high power illuminator, commercial light emitted diode (LED) is used as an alternative for laser light. The designed pulsating high power light source works with minimum pulse width of 125 ns, frequency of 500 Hz, and maximum electrical current of about 15 A. A trigger compatible with camera and light source is designed for synchronizing light pulses and camera shutter. In addition, commercial DSLR camera was used for implementation of single frame-multi pulse technique with no need for high speed camera. The images recorded by a DSLR camera shows drops with velocity of about 20-30 m/s and size of about 100-200 um being captured.

Keywords: Imaging, Shadowgraphy, Velocimetry, Pulsing Illuminator, Light Emitted Diode (LED)

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): kebriaee@sharif.ir

۲- دانشجوی دکتری: nasiri.hamidreza@ut.ac.ir

۱- مقدمه

اندازه‌گیری قطر و سرعت ذرات در بسیاری صنایع از جمله موتورهای احتراق داخلی، تونل‌های باد، لوله‌های انتقال سوخت و خروجی‌های احتراقی، از منظر پایداری واکنش و همچنین میزان تولید آلایندگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. امروزه قطر و سرعت ذرات از روش‌های مختلف مانند مالورن[1]، PDAP[2]، LDV[3] و PIV[4] با کمک لیزر و همچنین بر پایه تصویربرداری به‌دست می‌آیند. در روش‌های مبتنی بر لیزر اگرچه دقت اندازه‌گیری بالا بوده و در مواردی نیازی به کالیبراسیون وجود ندارد، به علت قیمت بالای این ابزار اندازه‌گیری و عدم دسترسی آسان، عملا استفاده از آنها در بخش‌های تحقیقاتی کشور امکان‌پذیر نیست.

روش PIV با استفاده از روش تصویربرداری به کمک دوربین پرسرعت و یک منبع نور لیزر دو پالس، غالبا در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش PIV، دامنه مورد نظر به کمک منبع نور پالسی با فرکانس مشخصی نورپردازی می‌شود. سپس با تصویربرداری از ذرات تزریق شده به جریان سیال و پردازش تصویر بر روی عکس‌های متوالی، اندازه و سرعت آنها ضمن کالیبراسیون‌های لازم تعیین می‌گردد. در مورد اندازه‌گیری قطرات به روش پردازش تصویر به علت چگالی کمتر آنها در مقایسه با روش PIV، این روش اصطلاحاً تحت عنوان PTV[5] شناخته می‌شود. نورپردازی در PTV به دو صورت، از کنار[6] و از پشت[7] امکان‌پذیر است. در نورپردازی از کنار، با ایجاد یک صفحه نور در میدان حرکت ذرات و در نهایت تفرق نور توسط آنها، تصویر ایجاد شده بر روی حسگر دوربین شامل یک پس زمینه سیاه با ذراتی روشن روی آن است. از آنجا که شدت تفرق نور توسط ذرات در این روش کم می‌باشد، لازم است برای نورپردازی از یک منبع قوی استفاده شود. در مقابل در روش نورپردازی از پشت، اثر وجود ذرات در زمینه عکس از طریق سایه ایجاد شده بر روی حسگر دوربین دیده می‌شود. در این روش ذرات به صورت نقاط تاریکی بر روی یک زمینه روشن مشاهده می‌شوند.

در روش نورپردازی از پشت که با عنوان سایه‌نگاری شناخته می‌شود، مقدار نور رسیده به صفحه تصویر و همچنین کنتراست ایجاد شده بر روی آن به مراتب بیشتر از روش PIV است. لذا در روش سایه‌نگاری امکان استفاده از منابع نوری کم قدرت‌تر مانند لامپ‌های زنون و دیودهای نوری وجود داشته و حتی می‌توان از نورپردازی حجمی که در آن چگالی نورپردازی کمتر از نورپردازی صفحه‌ای است، استفاده کرد. تعیین سرعت به کمک نورپردازی از پشت و با توجه به اصول اپتیکی سایه‌نگاری توسط حسن برای اندازه‌گیری جریان حبابی در سال ۲۰۰۱ گزارش شده است، [۱]. این روش برای تعیین سرعت قطرات اسپری برای اولین بار توسط استاودوردال و گراس تحت عنوان PSV[8] نامگذاری گردید [۲]. استاودوردال و گراس اصول تعیین سرعت ذرات به کمک روش سایه‌نگاری را در این کار شرح داده و روش را برای یک نمونه جت آب اعتبارسنجی نمودند. در این مقاله پیشنهاد گردید به علت عدم نیاز به یک منبع نور پرقدرت، از دیودهای نوری (LED) به جای لیزر استفاده شود. گراس و همکارانش به بررسی اثر پارامترهای مختلف در تعیین سرعت قطرات در این روش پرداختند و با استفاده از دیودهای نوری رنگی شرایط مختلف را مورد مطالعه قرار دادند [۳]. همچنین آنها از روش آزمایشگاهی معرفی شده در تعیین سرعت ذرات در نزدیکی دیواره استفاده نمودند [۴]. در ادامه، کاربرد این روش از نورپردازی، علاوه بر جریان‌های نزدیک به دیوار [۵] به سایر کاربردها از جمله مطالعه درون میکروکانال‌ها نیز تعمیم یافت [۷-۶].

همان‌طور که اشاره شد، ظهور روش PSV با به‌کارگیری LEDهای توان بالا به جای لیزرها همراه بود و همین امر سبب گردید در توسعه این روش، استفاده از LEDها رایج گردد. به‌طور کلی، امروزه از دیودهای نوری توان بالا می‌توان به عنوان منبع نور جایگزین لیزر استفاده کرد. علاوه بر قیمت پایین LEDها و طول عمر زیاد آنها در مقایسه با لیزر، این ابزار از یک نور یکنواخت و پایدار در شرایط پالسی نیز برخوردار می‌باشد. همچنین در LEDها به‌علت وجود طیف موج وسیع‌تر (±۱۰-۳۰ nm)، نقاط تاریکی که در نور لیزر وجود دارد، مشاهده نمی‌شود. LEDهای حالت جامد، قابلیت تولید توان تابشی بالاتر از ۱۰ W را داشته و با به‌کارگیری آنها در پالس‌های زمانی کوتاه، امکان استفاده در توان‌های به مراتب بالاتر نسبت به کارکرد پیوسته نیز وجود دارد. عملا این انرژی برای نوردهی ذرات میکرونی در روش PSV و حتی PIV کافی

1- Malveren
2- Phase Doppler Anemometry Particle
3- Laser Doppler Velocimetry
4- Particle Image Velocimetry
5- Particle Tracking Velocimetry
6- Scattering
7- Back-lit
8- Particle Shadow Velocimetry

است. در این شرایط با افزایش جریان، دمای صفحه LED زیر آستانه تخریب باقی می‌ماند اما شدت نور ساطع شده از آن افزایش خواهد یافت. این ویژگی سبب می‌شود LED ابزار مناسبی به عنوان منبع نور پالسی شناخته شود. در زمینه استفاده از LED به عنوان منبع نور پالسی، کارهای متفاوتی انجام شده است که به طور ویژه ویلرت و همکارانش نقش به‌سزایی در گسترش آن داشته‌اند. آنها با یک مطالعه جامع بر روی انواع LEDهای پرتوان در بازار به بررسی رفتار دیودهای نوری به‌ازای جریان‌هایی بیشتر از مقدار نامی پرداخته [۸] و مقدار شیفت فرکانسی نور و میزان نوردهی آنها را تا جریان‌هایی در حدود ۳۰ برابر مقدار نامیشان به‌دست آوردند [۹]. لازم به ذکر است این گروه تحقیقاتی با استفاده از جریان‌های بالای LED و فیبرنوری، روش PIV [۱۰] و توماگرافی [۱۱] را نیز بررسی کرده‌اند.

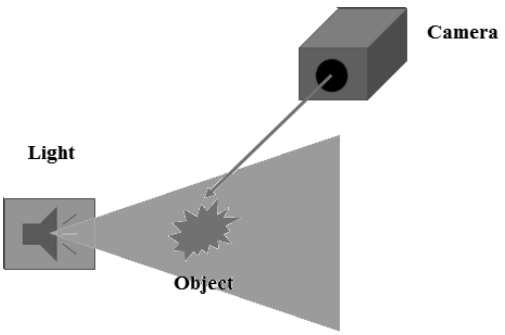
به طور کلی در جمع‌بندی استفاده از روش PSV می‌توان گفت: روش PSV به نسبت روش PIV دارای مزایایی است. اولا در روش PSV به علت عدم استفاده از منبع نور لیزری دو پالسه و جایگزینی منبع نور LED هزینه اولیه و تعمیرات دوره‌ای به مراتب پایین‌تر است. ثانیا به علت استفاده از نور LED فرکانس تصویربرداری در این روش می‌تواند به چند kHz ۱۰۰ نیز برسد که در روش PIV، رسیدن به چنین فرکانسی مستلزم استفاده از لیزرهای گران قیمت است. همچنین در روش PSV به علت نوردهی حجمی، تفرق که سبب اشباع شدن حسگر دوربین می‌گردد، حذف می‌شود که به همین علت از این روش برای مطالعه جریان‌های حبابی به‌جای روش PIV استفاده می‌شود. ضمنا در روش PSV به علت نورپردازی از پشت نسبت سیگنال به نویز تصویر از روش PIV بهتر است.

البته روش PSV مشابه تمام روش‌های اندازه‌گیری دارای محدویت‌هایی نیز هست. مهمترین مسئله در روش PSV خطای ایجاد شده در تصویر به علت نوردهی حجمی است. در این روش برای تصویربرداری از ذرات لازم است میدان دید[1](FOV) بسته به اندازه ذرات و دقت دوربین محدود گردد. استفاده از یک عمق میدان [2](DOF) محدود در این روش برای اندازه‌گیری ذرات در میدان مورد نظر ضروری است که استفاده از لنزهای مناسب در تنظیم این پارامترها مثمرثمر است. محدودیت بعدی در روش PSV، موضوع پردازش تصویر است. به علت نوردهی حجمی تعیین آستانه شدت برای تشخیص دقیق ذرات مشابه در روش MicroPIV و MiniaturePIV ضروری خواهد بود.

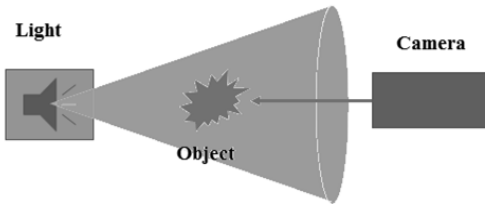
عدم دسترسی و هزینه بالای دوربین‌های پرسرعت و لیزرهای دوپالسه در داخل کشور، موجب شد تا در کار حاضر طراحی و ساخت یک نمونه ارزان قیمت مبتنی بر روش PSV صورت پذیرد. با توجه به توضیحات داده شده استفاده از منبع نور LED، نورپردازی تک‌فریم-چندنوره و یک دوربین تجاری معمولی DSLR[3]، امکان حذف لیزر و دوربین پرسرعت فراهم می‌شود. در ادامه تجهیزات موردنیاز در این خصوص بیان شده‌اند.

۲- روش سایه‌نگاری (PSV)

در شکل **۱** نحوه چیدمان ابزار اپتیکی برای نورپردازی از کنار PIV و از پشت PSV نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل **۱** نیز مشاهده می‌گردد، ابزار اصلی روش سایه‌نگاری شامل یک منبع نور پالسی با توان قابل قبول و یک دوربین می‌باشد. در روش سایه‌نگاری به علت نورپردازی حجمی، برای دست‌یابی به تصاویری با کیفیت قابل قبول لازم است از تجهیزاتی با DOF کم، مانند لنزهای ماکرو استفاده شود.



الف) نورپردازی از کنار



ب) نورپردازی از پشت

شکل (۱): نحوه چیدمان ابزار اپتیکی.

1- Field of View
2- Depth of View
3- Digital Single-Lens Reflex

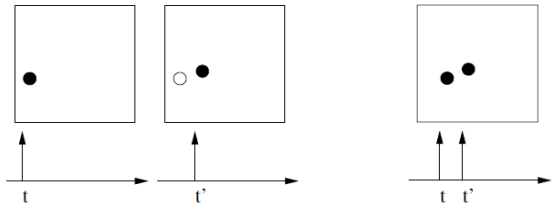
در روش‌های تصویربرداری برای سرعت‌سنجی قطرات، با تصویربرداری متوالی از قطرات و با کالیبراسیون ابعاد پیکسل و همچنین مشخص بودن فاصله زمانی بین دو تصویر امکان تعیین اندازه قطرات و سرعت آنها وجود دارد. روش PSV برای قطرات یک روش کاملا غیرتداخلی بوده و نیازی به اضافه کردن ذرات اضافی در میدان جریان وجود ندارد. در روش‌های تصویربرداری به منظور حذف نویزهای تشعشعی محیطی، از اتاق تاریک جهت تصویربرداری استفاده می‌شود.

۲-۱- دوربین

در تعیین سرعت ذرات به روش تصویربرداری، با گرفتن دو تصویر متوالی از حرکت ذرات و تعیین محل آنها در تصویر و محاسبه مقدار جابه‌جایی آنها پس از کالیبراسیون‌های لازم، در صورت مشخص بودن فاصله زمانی بین دو تصویر گرفته شده مقدار سرعت قابل محاسبه است. به طور کلی گرفتن دو تصویر متوالی از حرکت ذرات به دو روش تک‌فریم- چند نور و چند فریم- تک نور امکان‌پذیر است. در روش تک فریم- چند نور به کمک کنترل منبع نور پالسی، در یک فریم تصویربرداری شده بیش از یک بار به محل تصویر برداری نور تابیده شده و با پردازش تصویر مقدار جابه‌جایی ذره مشخص می‌گردد. در روش چند فریم- تک‌نور در هر فریم، یک نور تابیده می‌شود و با پردازش تصاویر بردار جابه‌جایی ذره تعیین می‌شود. در روش دوم برخلاف روش اول علاوه بر اندازه، بردار جابه‌جایی ذرات نیز مشخص می‌گردد. در شکل **۲** تفاوت این دو روش در تصویربرداری نشان داده شده است. در روش PSV اگرچه استفاده از روش چندفریم- تک‌نور هم از لحاظ پردازش تصویر و هم از نظر اطلاعات موجود بهتر است، دوربین‌هایی که قابلیت عکس‌برداری در فاصله زمانی کوتاه (تا ۱۰ میکروثانیه) و یا دو پالسه را داشته باشند، بسیار گران قیمت هستند. با توضیحات داده شده، استفاده از روش تک‌فریم- چند نور مقرون به صرفه بوده و امکان پیاده‌سازی آن حتی با دوربین‌های تجاری DLSR امکان‌پذیر است. البته از آنجا که این دوربین‌ها برای چنین مصارفی ساخته نشده اند، برای همزمان سازی آنها با منبع نور نیازمند طراحی و ساخت دستگاه همزمان ساز جداگانه‌ای هستیم.

۲-۲- منبع نوری

همان‌طور که گفته شد در این سامانه تصویربرداری از LED به عنوان منبع نور پالسی استفاده می‌شود. LED ها به عنوان منابع نوری پیوسته و یا پالسی قابل استفاده هستند.



شکل (۲): نحوه تصویربرداری از ذره، الف) تک‌فریم- چند نور ب) چندفریم- تک نور [۱۳].

در صورت استفاده از آنها در شرایط پالسی، قابلیت همزمانی LED با سامانه تک و یا چند دوربینه نیز وجود دارد که در این صورت از آنها برای تعیین بردار سرعت- جریان می‌توان استفاده نمود. نور LED قابلیت روشن نمودن ناحیه اندازه‌گیری را داشته و ایجاد سایه نیز نخواهد کرد. در مقایسه با نور لیزر LED دارای مزایای زیر است:

امنیت بهداشتی: نور تولید شده توسط LED قابلیت تمرکز بر روی پرتو نازک مانند لیزر را ندارد که سبب کاهش چگالی توان بیشینه می‌شود. بنابراین، خطر برخورد پرتوهای پرتوان با چشم یا بدن انسان در این حالت وجود نخواهد داشت.

واگرایی صفحه نوری: برای به‌دست آوردن صفحه باریک نوری، از یک دیافراگم در فاصله معینی از LEDها استفاده می‌شود. فاصله دیافراگم از LEDها و عرض دهانه دیافراگم پارامترهای تعیین کننده واگرایی صفحه نوری هستند. فاصله زیاد بین عدسی‌ها و شی و هچنین دهانه باریکتر دیافراگم سبب واگرایی کمتر نور می‌گردد. در حالت معمول واگرایی نور ایجاد شده توسط LED در حدود ۷ mrad است که این مقدار نسبت به واگرایی نور لیزر که در حدود ۰/۵ mrad است، زیاد می‌باشد اما نسبت به سایر روش‌ها مانند روش ADV[1] قابل اغماض است.

نوردهی حجمی: نوردهی حجمی برای اندازه‌گیری‌های سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شار رادیومتری ایجاد شده توسط LEDها برای چنین اندازه‌گیری‌هایی قابل استفاده است.

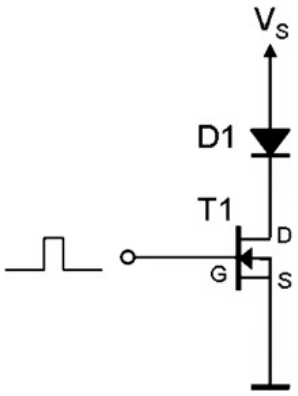
1- Acoustic Doppler Velocimetry

انعطاف‌پذیری: کنترل LEDها آسانتر از لیزر است. از طرفی وزن پایین LEDها و عدم حساسیت در برابر ضربه از مزایای جایگزینی LED به‌جای نور لیزر است. از طرفی این منابع نوری نیاز به محافظ‌های نوری در برابر نورهای انعکاسی ندارند.

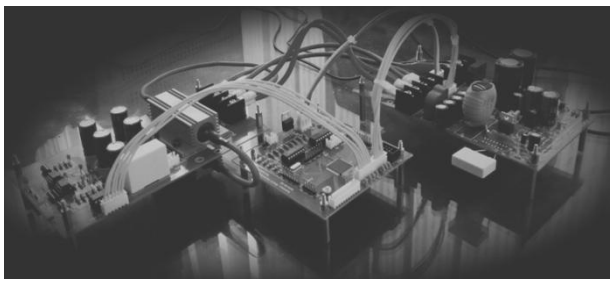
اقتصادی: از لحاظ هزینه، استفاده از LEDها کاملا مقرون به صرفه در مقایسه با نور لیزر است [۱۲].

جهت راه‌اندازی LEDها با فرکانس تکرار بالا، پهنای پالس کوتاه و توان زیاد، نیازمند طراحی دقیق یک مدار الکترونیک قدرت نسبتا پیچیده خواهیم بود. ترکیب سه ویژگی ذکر شده در کنار یکدیگر ملزم می‌سازد تا به کوچکترین موارد در طراحی و ساخت برد های الکترونیکی نیز دقت شود.

طبق روابط قانون اهم در خصوص نسبت ولتاژ- جریان، درصورت نیاز به عبور جریان بالا از LED می‌بایست اطلاع دقیقی از مقدار مقاومت داخلی آن وجود داشته باشد. به دلیل ذات نیمه رسانایی LED مقاومت داخلی آنها خطی و ثابت نبوده و همچنین به دلیل اثرات سلفی و خازنی نهفته در آن می‌تواند در فرکانس‌های بالا رفتارهای نامشخصی نیز داشته باشند. به همین دلیل برای ساده‌ترین فرض اگر جریانی در حدود ۱۰ آمپر از دیود نوری عبور کند و مقاومت آن طبق نمودار مشخصه خود در این جریان ۲ اهم باشد، طبق قانون اهم به ۲۰ ولت اختلاف پتانسیل نیاز خواهد بود. بنابراین برای ایجاد حالت پالسی، از منبع پتانسیلی ۲۰ ولتی و یک مدار سوئیچینگ استفاده خواهد شد که در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می شود شماتیک ساده مدار شامل یک منبع ولتاژ (Vs)، کلید قدرت (T1)، دیود نوری (D1) و پالس الکتریکی اعمال شده توسط مدار دیجیتال می‌باشد. تولید پالس‌های الکتریکی با سطح ولتاژ، پهنای متفاوت و دقت موردنیاز اغلب توسط مدارهای مجتمع (میکروکنترلر یا میکروپروسسور) قابل دست‌یابی است. اما برای ساخت مدار قدرت، لازم است موارد بسیاری در نظر گرفته شود که شاید بدون تست عملی امکان مستند سازی آنها وجود نداشته باشد. در شکل **۳** مدار شماتیک عمومی یک سامانه کلید زنی متعارف نمایش داده شد. اما در حالت واقعی به دلیل خواص نهفته سلفی، خازنی و مقاومتی که در قطعات مدار وجود دارد یا در فرکانس‌های بالا اثرات خود را بروز می‌دهند نیازمند افزودن بخش‌های گوناگون دیگری به این شماتیک ساده می‌باشیم. این افزونه‌های جانبی بر حسب مورد کاربرد که جریان کاری و پهنای پالس خواهند بود و همچنین المان‌های استفاده شده خصوصا LED می‌بایست جداگانه طراحی شوند. در شکل **۴** نمونه آزمایشگاهی ساخته شده توسط نویسندگان مقاله به همراه مدارهای جانبی نمایش داده شده است



شکل (۳): شماتیک مدار منبع نور پالسی.

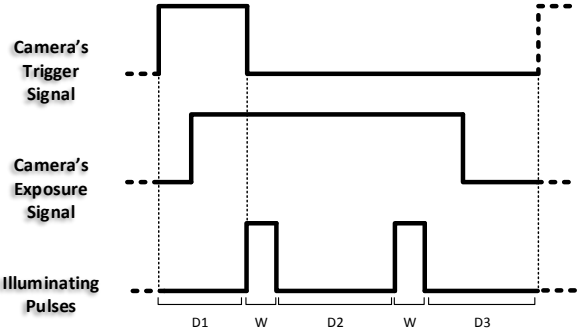


شکل (۴): نمونه مدار الکترونیکی ساخته‌شده جهت ساخت سامانه پرتوان پالسی نوری.

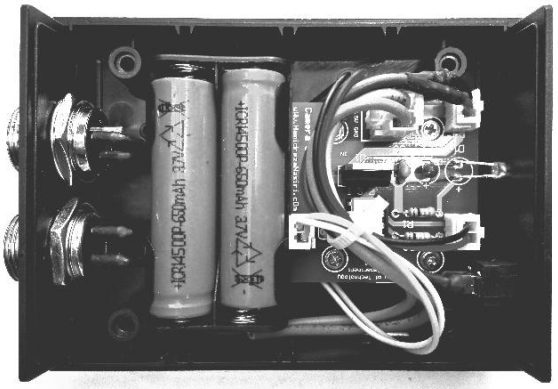
۲-۳- سامانه همزمان‌ساز

مطابق شکل **۲** در روش PSV لازم است زمان پالس تصویربرداری و نوردهی کنترل گردد. همان‌طور که در شکل **۵** ملاحظه می‌گردد به کمک یک سامانه همزمان‌کننده، با یک تاخیر مشخص که از ذات سامانه کنترلی و دوربین نشأت می‌گیرد، شاتر دوربین باز می‌گردد، یک پالس نوری کوتاه به وسیله منبع نور LED در زمان باز بودن شاتر دوربین داده شده و تصویر جسم گرفته می‌شود. در روش تک‌فریم- چند نور پس از زدن پالس اول نور، شاتر دوربین همچنان باز بوده و پس از یک بازه زمانی مشخص پالس نوری دوم زده و تصویر دوم بر روی حسگر دوربین نقش می‌بندد. در نهایت با پردازش تصاویر گرفته شده، مقدار سرعت ذرات تعیین خواهد شد.

در شکل **۶** همزمان‌ساز طراحی‌شده توسط نویسندگان مقاله نشان داده شده است.



شکل (۵): نحوه پالس‌دهی در تصویربرداری پرسرعت.



شکل (۶): سامانه همزمان‌ساز دوربین و نور پالسی.

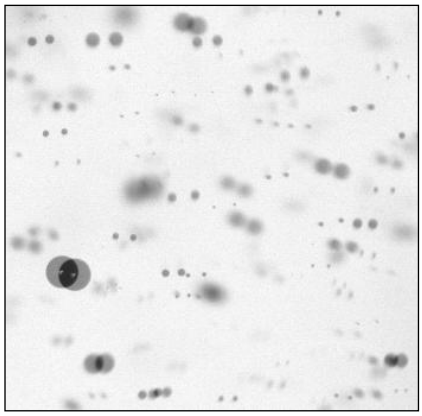
به طور کلی پهنای نور پالسی و زمان بین دو پالس متوالی وابسته به اندازه و سرعت ذرات می‌باشد. کوتاه بودن پهنای نور پالسی در سرعت‌های بالا سبب ثابت ماندن سایه ذره و جلوگیری از تار شدن تصویر می‌گردد.

همچنین، فاصله زمانی بین دو پالس نوری علاوه بر سرعت و ابعاد ذرات وابسته به مشخصات حسگر دوربین، زاویه واگرایی و فاصله جسم از دوربین می‌باشد. بنابراین لازم است فاصله دو تصویر گرفته شده از هم به اندازه‌ای نباشد که در پردازش تصویر مشکل ساز شود.

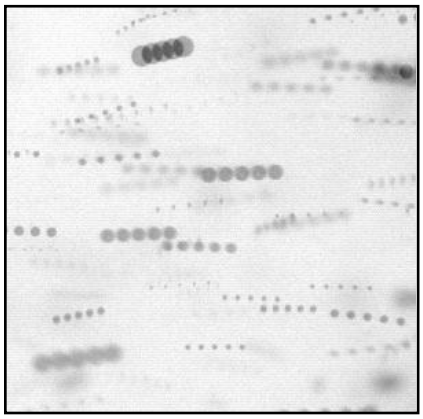
۳- نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد از روش سایه‌نگاری به منظور تعیین ابعاد و سرعت قطرات اسپری و بررسی جهت جریان استفاده شده است. همان‌طور که در شکل **۷** مشاهده می‌شود از روش یک فریم- دو نور و یا یک فریم- چند نور برای تعیین مقدار جابه‌جایی و سرعت ذرات می‌توان استفاده نمود، [۲].

در سامانه طراحی شده به وسیله نویسندگان مقاله، عملکرد منبع نورپالسی به کمک LEDهای موجود در بازار ایران با توان حدودا 1W و خروجی قطرات اسپری شده از یک انژکتور اتمسفریک آزمایش شد.



(الف) تک‌فریم- دونور



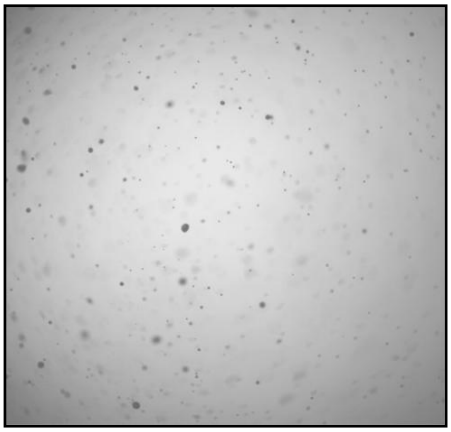
(ب) تک‌فریم- پنج نور

شکل (۷): تصاویر گرفته‌شده جهت تعیین سرعت قطرات [۲].

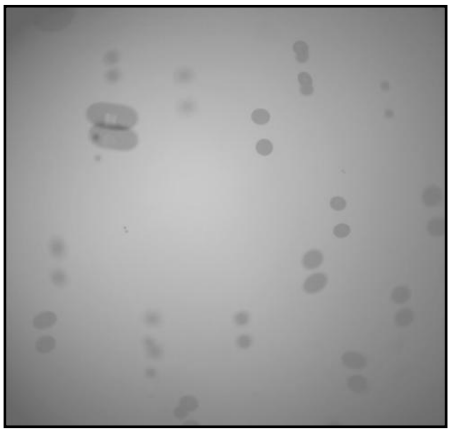
زمان باز بودن دریچه دوربین در حدود ۱۰۰ ms بوده و فاصله دو پالس نوری ۵۰ us است. دوربین مورد استفاده از نوع نیکون D7100 با لنز AF-S Micro Nikkor ۱۰۵ mm می‌باشد.

همان‌طور که در شکل **۸- الف** ملاحظه می‌شود با وجود سرعت بالای قطرات که در حدود ۲۰-۳۰ m/s و اندازه آنها که زیر ۱۰۰um است، قطرات به خوبی در تصویر ثابت شده اند. در این تصویر پهنای پالس نوری به کاربرده شده در حدود ۲۵۰ ns و جریان عبوری از دیود نوری در حدود ۱۵ A است. این تست به ازای اختلاف فشار اعمالی۳۰ بار بر روی یک انژکتور فشاری- چرخشی گرفته شده است و فریز شدن قطرات در چنین اختلاف فشاری نشان می‌دهد به‌ازای فشارهای پایین‌تر

که مقادیر نامی انژکتور است امکان تصویربرداری بدون هیچ‌گونه مشکل سخت‌افزاری وجود خواهد داشت. در شکل **۸-ب** نیز از روش تک فریم- دوپالس برای سرعت‌سنجی قطرات استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود در شکل جفت دوتایی قطرات قابل تشخیص بوده و با پردازش تصویر امکان تعیین بردار جابه‌جایی قطرات و تعیین سرعت وجود دارد.



(الف) تک‌فریم- تک‌نور برای اندازه‌گیری ابعاد



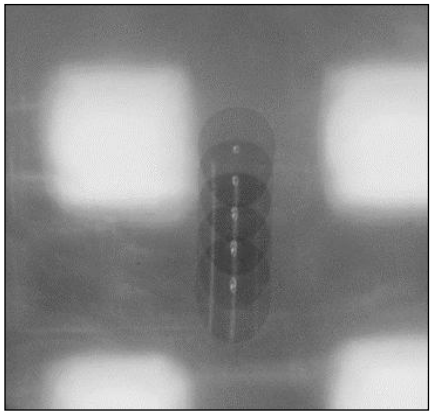
(ب) تک‌فریم- دو نور برای سرعت‌سنجی

شکل (۸): بررسی استفاده از تکنیک های مختلف نورپردازی در عکس برداری.

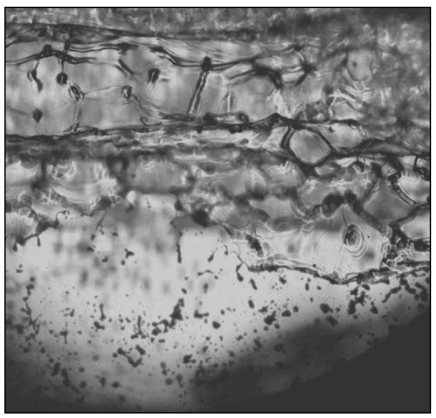
در شکل **۹** نیز از روش تک فریم- پنج نور استفاده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک فریم ۵ بار نور به فاصله ۲۰ us زده شده و ۵ تصویر از قطره در حال حرکت مشاهده می‌شود. این حالت علاوه بر تعیین اندازه و سرعت قطرات، جهت پی‌گیری آنها در میدان نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع این تصویر توانایی بالای کنترل دیود نوری و استفاده از آن در شرایط پالسی مختلف با فاصله زمانی‌های کوتاه را نشان می‌دهد که چنین امری در نور لیزر غیر ممکن بوده و یا با هزینه بسیار ممکن می‌باشد.

لازم به ذکر است از دستگاه حاضر علاوه بر تصویربرداری قطرات در شرایط اتمیزاسیون ثانویه برای مطالعه اتمیزاسیون اولیه برای انواع انژکتور می‌توان استفاده نمود. در شکل **۱۰** شکست فیلم مایع خارج شده از یک انژکتور فشاری- چرخشی و تبدیل آن به لیگامنت‌ها به کمک سخت‌افزار حاضر به خوبی ثبت شده است. همان‌طور که در شکل نیز ملاحظه می‌شود طول موج‌های ناپایداری نیز در شکل قابل تشخیص بوده و از تصویر حاضر به خوبی جهت مطالعه اتمیزاسیون اولیه می‌توان استفاده نمود.



شکل (۹): روش تک‌فریم- پنج نور به کمک دستگاه PSV

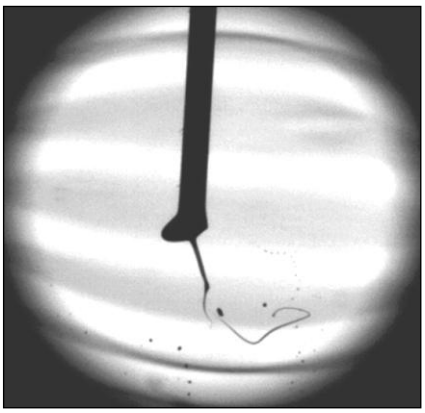


شکل (۱۰): شکست فیلم مایع خارج شده از انژکتور فشاری- چرخشی

در شکل **۱۱** نیز شکست جت مایع و تبدیل آن به لیگامنت‌های اولیه و در نهایت تبدیل آن به قطرات قابل مشاهده است. لازم به ذکر است این تصاویر برای اولین بار در کشور گرفته شده است و قبل از آن به دلیل عدم وجود چنین دستگاهی عملا تصاویر بدون وضوح و با کشیدگی زیاد قطرات

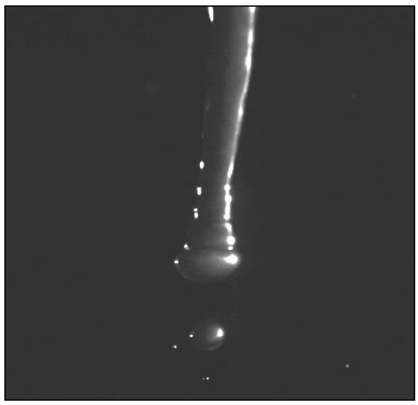
مورد مطالعه قرار گرفته است. نکات قابل توجه در شکل **۱۱** آن است که به دلیل استفاده از روش سایه‌نگاری در شکل حاضر وجود قطراتی که در خارج صفحه فوکوس می‌باشند نیز قابل تشخیص بوده که این امر در روش نورپردازی از کنار امکان‌پذیر نیست.

در ادامه قابلیت‌های سامانه نورپردازی جهت فریز کردن شرایطی که قطره به دیوار برخورد می‌کند، در شکل **۱۲** نشان داده شده است. طول موج های تشکیل شده بر روی فیلم مایع ایجاد شده ناشی از برخورد قطره با دیوار، ایجاد تاج ایجاد شده بر روی سطح بالایی فیلم و جدا شدن لیگامنت‌ها از تاج به خوبی در شکل قابل تشخیص می‌باشد. اگرچه سامانه حاضر برای روش سایه‌نگاری طراحی شده است و نورپردازی از کنار در شرایط پرسرعت مستلزم نور بیشتری است در شکل **۱۳** نمونه‌ای از پیاده‌سازی نورپردازی از کنار، جهت مطالعه شکست جت مایع، نشان داده شده است.



شکل (۱۱): استفاده از روش سایه‌نگاری جهت بررسی شکست جت و تشکیل لیگامنت‌ها

شکل (۱۲): استفاده از روش سایه‌نگاری جهت مطالعه برخورد قطره به دیوار



شکل (۱۳): استفاده از روش نورپردازی از کنار جهت مطالعه شکست جت مایع

اگرچه کنتراست تصویر به نسبت روش سایه‌نگاری کمتر است لیکن امکان مطالعه شکست جت به کمک تصاویر گرفته شده وجود دارد. لازم به ذکر است روش تصویربرداری در واقع مهمترین و رایج‌ترین روش مطالعه پدیده اتمیزاسیون اولیه است و اگرچه روش‌های جایگزینی مانند روش PDAP برای مطالعه سرعت و اندازه قطرات وجود دارد، اکثر روش‌های لیزری به علت شرایط پیچیده و شکل‌های نامتعارف لیگامنت‌ها در نزدیکی محل شکست جت و فیلم مایع در مطالعه پدیده اتمیزاسیون اولیه ناتوان می‌باشند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی یک سامانه سایه‌نگاری پرسرعت ارزان قیمت شرح داده شده است. در روش سایه نگاری بر خلاف روش PIV، نوردهی از پشت جسم صورت گرفته و بنابراین، می‌توان از LED های پرتوان به‌جای لیزر استفاده نمود.

همچنین، با استفاده از یک منبع نور پالسی، دوربین تجاری DSLR و همزمان‌سازی این دو از طریق روش تک‌فریم- چند نور، لزوم استفاده از دوربین‌های پرسرعت را ملغی نمود. بنابراین، قیمت تمام شده با حذف دوربین پرسرعت و لیزر به شدت کاهش خواهد یافت.

منبع نور پالسی طراحی‌شده در کار حاضر قابلیت ایجاد پالس‌های نوری حداقل ۱۲۵ ns با فرکانسی در حدود ۵۰۰ Hz و جریان ۱۵ A را دارا می‌باشد. این جریان حدودا ۱۵ برابر مقدار جریان نامی LED است.

همچنین، قابلیت استفاده از روش سایه‌نگاری به کمک دستگاه نور پالسی طراحی شده جهت مطالعه انواع اتمیزاسیون

اولیه شامل شکست و ناپایداری فیلم مایع و جت مایع مورد بررسی قرار گرفت که کیفیت تصاویر ضبط شده بیان‌گر آن هستند که استفاده از سامانه حاضر جهت مطالعه اتمیزاسیون اولیه ممکن می‌باشد.

۵- مراجع

1. Hassan, Y. "Full-Volume, Three-dimensional, Transient Measurements of Bubbly Flows, Using Particle Tracking Velocimetry and Shadow Image Velocimetry, Coupled with Pattern Recognition Technique", Texas A&M University, Project DE-FG07-98ID13638, 2001.
2. Estevadeordal, J. and Goss, L. "PIV with LED: Particle Shadow Velocimetry (PSV)", The 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA 2005-37, 2005.
3. Goss, L. and Estevadeordal, J. "Parametric Characterization for Particle-Shadow Velocimetry (PSV)", The 25th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, AIAA 2006-2808, 2006.
4. Goss, L., Estevadeordal, J., and Crafton, J.W. "Velocity Measurements Near Walls, Cavities, and Model Surfaces, Using Particle Shadow Velocimetry (PSV)", The 22nd International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, pp. 1-8, 2007.
5. Braun, T. "Particle Shadow Velocimetry in the Wall Region of a Turbulent Pipe Flow", M.Sc. Thesis, Mechanical Engineering Department,The Pennsylvania State University, 2010.
6. Khodaparast, S., Borhani, N., Tagliabue, G., and Thome J.R. "A Micro Particle Shadow Velocimetry (μPSV) Technique to Measure Flows in Microchannels", Experimental Fluids, Vol. 56, pp. 1474-1487. 2013.
7. Khodaparast, S., Borhani, N., and Thome J.R. "Application of Micro Particle Shadow Velocimetry μPSV to Two-phase Flows in Microchannels", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 62, pp. 123–133. 2014.
8. Willert, C., Moessner, S., and Klinner, J., "Pulsed Operation of High Power Light Emitting Diodes for Flow Velocimetry", The 8th International Symposium on Particle Image Velocimetry-PIV09, Melbourne, Victoria, Australia, pp.25-28, 2009.
9. Willert, C., Stasicki, B., Klinner, J., and Moessner, S., "Pulsed Operation of High-Power Light Emitting Diodes for Imaging Flow Velocimetry", Measurement Science and Technology, Vol. 21, No. 7, pp. 1-11, 2010.
10. Willert, C., Freitag, S., and Hassa, Ch. "High Speed Imaging of Fuel Sprays, Using A Low cost Illumination, Source", The 22nd European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Italy, p.15, 2008.
11. Buchmann, N.A., Willert, C., and Soria, J. "Tomographic Particle Image Velocimetry, Using Pulsed, High Power LED Volume Illumination", The 9th International Symposium on Particle Image Velocimetry – PIV'11, Kobe, Japan, 2011.
12. Groß, D., Brevis, W., and Jirka. G.H. "Development of a LED-Based PIV/PTV System: Characterization of the Flow Within a Cylinder Wall-Array in a Shallow Flow", The Int. Conf. on Fluvial Hydraulics River Flow, pp. 8-10, 2010.
13. Raffel, M., Willert, Ch., Wereley, S., and Kompenhans, J. "Particle Image Velocimetry", Springer, Berlin, 2007.