

Three Dimensional Laser Scanning System for Illumination of Fluorescent flow for the Environmental Hydraulic researches


Ozeair Abessi ^{1*}, Ali Rahmani Firoozjaee ¹, Mehdi hamidi ¹, Mohammadamin Bassam ², Zahra Khodabakhshi ³

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2- Faculty member, Power and Electronic institute, Malek Ashtar University, Tehran, Iran.

3- MSc. Molecular and nuclear physics, Shahrood University of Technology, Iran.

*Oabessi@nit.ac.ir

Received: 12 September 2019, Accepted: 15 February 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The experimental modeling and laboratory observation is probably the first step in the recognition of the flow complicated behavior in fluid mechanics. Since long time ago, various methods have developed for the measurement of the flow parameters. These methods are based on the illumination and inscription of flow variables in different conditions. Facilities and equipment were temperature and conductivity probes for scalar quantities and Hot-wire anemometers and Acoustic Doppler Velocimeters for velocity measurement as a vector variable in each point. Such equipment will cause disturbances in the flow as they are intrusive into the body of the ambient water. The measurements are point-based and data sampling needs too many probes for each test. Therefore, these probes do not appropriate for data sampling in many applications of the experimental fluid mechanics, especially in small scales. With recent progress in digital technologies, there are various methods have newly developed for the inspection of the concentration and velocity field that are non-intrusive. These methods are more based on the flow simulation in the transparent chamber, flow illumination with laser and fluorescent or small particles and filming the flow with high accuracy for later visual processing.

Methodology: In this paper, the capabilities of the three-dimensional laser scanning system are exhibited which is developed for first time in Iran at Babol Noshirvani University of Technology (BNUT). It includes a water tank, pomp, the three-dimensional laser scanning system, high-speed camera, and data processing apparatus that all located in the darkroom. The optical system consists of two fast scanning mirrors that drive the beam from an argon-ion laser through the flow in a programmed pattern. The system is controlled by a computer for overall timing control, and image capture. Having added an infinitesimal quantity of a fluorescent dye (Rhodamine 6G, Sigma-Aldrich, St. Louis, Missouri), the discharged effluent would be fluoresced under the impression of the laser. So due to the function of laser beam, the jet of fluorescent illuminated and recorded in the wavelength of orange light. The orange filter is used to filter out all the scattered lights of the green laser to increase the contrast, and accordingly quality of the images. The apparatus is set in a glass-made tank with 2m length, 0.8m width, and 1m height, respectively. A charge-coupled device (CCD) camera with the resolution of 640x480 pixels was successively capturing the reflected light in the separated

illustrations, at approximately 100 frames per second. Each captured illustration had to be modified for laser attenuation and sensor response at each pixel by using clear and dyed water. Having used image processing techniques in a software coded in C#, subsequently, the stream of images for unsteady flow and also time-averaged results were obtained. So, the images are processed by a specially written computer program NITLIF, which is a new version of TFLOOK that previously was developed by Tian and Roberts (2003) at Georgia Institute of Technology. This software through lengthy computational procedures that explained by Tian and Roberts (2003) computes concentration pixel-by-pixel after a complicated calibration process. The images then turn into a real scale of position, time and concentration for every single frame in Tecplot. The program eventually can time-averaged the frames and placed them next to each other to form a two dimensional or three-dimensional configuration of flow dynamic. The accuracy of the dilution measurements is computed 10%. It should be noticed that this system had been originally incepted by Tian and Roberts (2003) and the one that developed here is the new version of it that upgraded for temporal analysis and space-time evolution of the concentration field.

Results and discussion: The system is designed in a way that can record and visualize the three-dimensional configuration of the flow. Due to fast recording of the experiments with our high-speed camera with the frequency of 100 Hz, this apparatus is appropriately able to physically analyze the turbulence of the flow, turbulence energy spectrum and intensity and strength profile of the flow. The turbulence is a fluid motion that characterized by chaotic changes in flow variables. Getting 100 Hz data from each point in this system makes us be able for the frequency analysis of flow turbulent properties.

Conclusion: As a demonstration, the results of our observation for an inclined dense jet are exhibited. Th temporally-averaged intensity along vertical cut and energy spectrum are plotted at jet maximum height together with the instantaneous and time-averaged 2D and 3D configurations of the flow. Turbulence kinetic energy spectrums are well fitted with the $-5/3$ power law of Kolmogorov theory for the inertial subrange. The time-averaged intensity distribution shows that for the location of maximum high, eddies are always present in centerline which shows the dominance of jet-like behavior in this point.

Keywords: Laser, Fleurcent, 3D scanning, Environmental Hydraulic, Turbulence.

توسعه سامانه اسکن لیزری سه بعدی آشکارساز جریان فلورسنت در تحقیقات هیدرولیک محیط زیست

عزیز عابسی^{۱*}، علی رحمانی فیروزجایی^۱، مهدی حمیدی^۱، محمد امین بصام^۲، زهرا خدابخشی^۳

۱- عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران.

۲- عضو هیات علمی، مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه مالک صنعتی اشتر تهران، ایران.

۳- کارشناس ارشد فیزیک اتمی و مولکولی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران.

*Oabessi@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۲، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶ و وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: مدلسازی و مشاهده پدیده‌های هیدرولیکی در آزمایشگاه را شاید بتوان نخستین گام در راستای شناخت رفتار پیچیده فرایندهای طبیعی در مکانیک سیالها دانست. در این زمینه از زمان‌های دور، روشهای مختلفی برای اندازه‌گیری فراسنجه (پارامتر) های جریان توسعه داده شده است. این روش‌ها اغلب مبتنی بر آشکارسازی و ثبت متغیرهای جریان در شرایط مختلف حرکت می‌باشند. با توسعه فناوری‌های دیجیتال در سال‌های اخیر، روش‌های متنوعی برای ثبت میدان غلظت و سرعت جریان بدون ایجاد تداخل در محیط توسعه داده شده است. این روش‌ها بیشتر مبتنی بر شبیه‌سازی جریان در محفظه‌های شیشه‌ای و شفاف، آشکارسازی جریان با کمک لیزر، فلورسنت و ذرات ریز و ثبت تصاویر با دقت و بسامد بالا برای پردازش ثانویه است. در این تحقیق، قابلیت‌های سامانه اسکن لیزری سه بعدی که برای آشکارسازی جریان آغشته به فلورسنت در بررسی‌های هیدرولیک محیط زیست برای نخستین بار در ایران و در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل توسعه داده شده است، معرفی می‌گردد. در این سامانه با تابانیدن نور لیزر به جت حاوی فلورسنت و تحریک آن، نسبت به آشکارسازی جریان و ثبت تصاویرهای آزمایش در طول موج خاصی از نور نارنجی اقدام می‌شود. افزون بر تصویرسازی دو بعدی، این سامانه به نحو خاصی طراحی شده است که امکان ثبت و تصویرسازی سه بعدی آزمایش‌ها را نیز داشته باشد. به کمک این سامانه همچنین با تصویربرداری سریع با نرخ 100 HZ از آزمایش‌ها، تحلیل بسامدی جریان‌های آشفته، توسعه طیف انرژی آشفته‌گی و محاسبه نیمرخ شدت و قدرت آشفته‌گی امکان پذیر می‌باشد.

کلید واژگان: لیزر، فلورسنت، اسکن سه بعدی، هیدرولیک محیط زیست، آشفته‌گی.

۱- مقدمه

پدیده در ابعاد کوچک در آزمایشگاه، امکان شناسایی رفتار جریان‌ها در حالت‌های مختلف با سادگی و دقت بیشتری ممکن می‌باشد (Abessi et al., 2011). این شبیه‌سازی‌ها در نهایت منجر به شناسایی رژیم‌های مختلف جریان و نحوه اندرکنش سیال با مرزهای محیط، هوا و رسوب می‌شود. رفتار مشاهده شده در ادامه توسط دیگر محققان برای شبیه‌سازی ریاضی حالت‌های پیچیده‌تر استفاده می‌شود (Saeedi et al., 2012). به این ترتیب مشاهده‌های آزمایشگاهی، همواره مبنای توسعه نظریه‌های علمی بزرگ

آشنایی انسان با جریان سیال در محیط از سال‌های بسیار دور با مشاهده مستقیم در طبیعت آغاز شده است. یکجانشینی و توسعه نخستین شهرها با توسعه سامانه‌های هیدرولیکی پیچیده در ساختارهای دست ساز بشر همراه بوده است. پس از انقلاب صنعتی با توسعه علم، بررسی رفتار سیال در محیط‌های مختلف از مشاهده‌های مستقیم در طبیعت به شبیه‌سازی کنترل شده رفتار سیال در ابعاد کوچکتر در آزمایشگاه، متمایل شده است. با شبیه‌سازی

برای اندازه‌گیری نقطه‌ای فراسنجه‌ها مورد توجه قرار گرفت (Robert and Tom 1987; Roberts et al., 1997). با استفاده از سنجنده‌های نقطه‌ای می‌توان کمیت‌ها را با دقتی بالا در نقطه‌های نمونه‌برداری و به صورت لحظه‌ای (در زمان) اندازه‌گیری کرد. استفاده از روش‌های آشکارسازی Schlieren photography و نوردهی حباب‌های هیدروژن برای مشاهده ساختارهای جریان و مسیر حرکت بسته‌های سیال نیز طی سال‌های بعد مورد توجه قرار گرفته است (Abessi et al., 2017). ورود روش‌های فیلم و عکس برداری به آزمایشگاه‌های مکانیک سیال‌ها و قرار دادن نگاتیو عکس‌ها روی یکدیگر برای دستیابی به تصویر میانگین از رفتار یک آزمایش متغیر در زمان طی این سال‌ها عمومیت پیدا کرده است (Abessi, 2018).

طی دهه‌های بعد با توسعه فناوری، به تدریج امکان مدلسازی آزمایشگاهی حالت‌های پیچیده‌تر با دقتی فراتر از آنچه که به آن دست یافته شده، میسر شد. در سال‌های پایانی دهه ۱۹۹۰ در مطالعه‌های هیدرولیک محیط زیست پخشیدگی غلظت به عنوان یک کمیت اسکالر با انواع حسگرهای دما، هدایت الکتریکی، اکسیژن محلول و ... ثبت شده و سرعت به عنوان یک کمیت برداری به استفاده از Hot-wire anemometers و Acoustic Doppler Velocimeters (ADV) به صورت نقطه‌ای و در زمان اندازه‌گیری می‌شد. این ادوات به دلیل ورود به بدنه آب و اندازه بزرگ خود باعث ایجاد انواع آشفتگی‌های نامطلوب در جریان سیال می‌شوند و این از مهم‌ترین نقاط ضعف آنها محسوب می‌آید. افزون بر آن، به دلیل اندازه‌گیری نقطه‌ای و شمار مشخص حسگرهایی که می‌توان به کار گرفت، داده‌های به دست آمده محدود بوده و هزینه انجام آزمایش‌ها بسیار زیاد می‌باشد. در دو دهه اخیر با توسعه انواع لیزرها، تجهیزات دیداری و دوربین‌های دیجیتال مجموعه‌ای از روش‌های آزمایشگاهی مدرن توسعه داده شده است که نیازمند به نفوذ به داخل سیال نبوده (non intrusive) و بدون ورود به محیط آزمایش، از خارج سیال اندازه‌گیری کمیت‌های مورد نیاز ممکن می‌باشد. از جمله این روش‌ها می‌توان به Laser Doppler Velocimetry (LDV) و Particle Image Velocimetry (PIV) برای

و پیچیده بوده‌اند. نظریه‌هایی که امروزه زیربنای دانش بشری در توسعه و خلق انواع سدها و سازه‌های کنترلی، بنادر، کشتی‌ها و شناورها، هواپیماها و خودروها و حتی موشک‌ها و ماهواره‌ها هستند.

نخستین مشاهده‌های علمی در دسترس در ارتباط با رفتار سیال‌ها و اندرکنش آنها با محیط، به مشاهده‌های ارشمیدوس (278-212 BC) بر می‌گردد. لئوناردو داوینچی دانشمند شهیر سده ۱۵ میلادی با مستندسازی رفتار جریان‌های آشفته در گزارش‌ها و طرح‌واره‌های خود اقدام به بررسی این نوع جریان‌ها نموده است. نیوتون نامدارترین دانشمند هزاره دوم (1727-1642 AC) بررسی‌های جامعی در ارتباط با حرکت انواع سیال‌های لزج و غیرلزج در شرایط مختلف انجام داده است. این بررسی‌ها در ادامه توسط دانشمندان حوزه علوم طبیعی و ریاضیات از جمله برنولی (1748-1667)، اویلر (1783-1707)، ناپیر (1836-1785)، استوکس (1903-1819)، رینولدز (1912-1842)، پرانتل (1953-1875) و تیلور (1975-1886) و بسیاری از نام‌آشنایان دیگر در حوزه‌های مختلف، که شرح آن در این مختصر نمی‌گنجد، پیگیری شده و مبنای توسعه علوم وابسته بوده است. مشاهده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی و ثبت رخدادها در ابعاد کوچک در واقع مبنایی برای شناخت علمی و توسعه معادله‌های حاکم در علوم طبیعی می‌باشد.

در فیزیک و پیرو آن در مکانیک سیال‌ها متغیرهای جریان را می‌توان به دو دسته اسکالر و برداری تقسیم کرد. روش‌های آزمایشگاهی با شبیه‌سازی پدیده در ابعاد کوچک، معمولاً به دنبال اندازه‌گیری یکی از انواع این متغیرها می‌باشند. در آغاز مشاهده‌ها بیشتر چشمی و بدون ثبت رخدادها و با استفاده از تزریق جوهر و اندازه‌گیری فراسنجه‌ها با کمک روش‌های مکانیکی اعم از انواع پیزومترها، لوله پیتوت و فشارسنج‌ها بوده است. در سال‌های پایانی دهه ۱۹۷۰ استفاده از نمونه‌برداری درجا توسط لوله‌های مکش برای برداشت حجم کنترل شده‌ای از جریان برای اندازه‌گیری غلظت ماده ردیاب در سیال، مورد توجه قرار گرفت (Roberts, 1979). در این سال‌ها به تدریج استفاده از حسگرها و سنجنده‌های آنالوگ و بعد دیجیتال

شفاف و غیرکدر در فرایند انجام آزمایش‌ها، به شبکه آب شهری متصل شده است. منبع پرتوی لیزر با طول موج ۵۱۴ نانومتر در کنار مخزن قرار گرفته و همراه با سامانه کنترلی و دوربین دیجیتال به یک پردازشگر مرکزی برای کنترل فرایندهای آزمایش، متصل شده است. در طراحی یک آزمایش نمونه برای مشاهده توانایی‌های این سامانه، جهت شبیه‌سازی تخلیه جت فاضلاب سنگین در محیط‌های ساکن، از یک نازل مایل با زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق به قطر ۲ میلی‌متر استفاده شده است. نازل روی یک سامانه ریلی در قاب بالایی تانک قرار گرفته و از طریق شیلنگ و شبکه لوله‌کشی ظرفی به منبع آب شور آغشته به فلورسنت متصل شده است. جریان فاضلاب شور از طریق پمپی به توان ۰/۵ وات، لوله‌های انعطاف‌پذیر و با عبور از فلومتر به نازل درون مخزن هدایت می‌شود. جریان خروجی در آغاز در اثر مومنتوم اولیه خود به سمت بالا رفته و به بیشترین ارتفاع خود می‌رسد. با اضمحلال مومنتم اولیه به تدریج سنگینی فاضلاب شور غالب شده و جریان رفتاری پلوم شکل به خود می‌گیرد. در نهایت فاضلاب خروجی بعد از رسیدن به نقطه اوج به سمت کف برمی‌گردد و در روی بستر محیط به صورت جریانی چگال جریان می‌یابد. جهت ثبت سه بعدی آزمایش‌ها، پرتوی نور لیزر با کمک ساختارهای طراحی شده با حرکت به سمت بالا و دوطرف، صفحه‌های لیزری متعدد ایجاد کرده و محدوده مورد نظر را به طور متناوب دوبار در ثانیه روشن می‌سازد. این صفحه‌ها با اسکن حجم مشخصی از سیال از جلوی تخلیه‌کننده در فعالیت همزمان با دوربین، حجم کنترلی از سیال را به صورت سه بعدی اسکن خواهند کرد. با تزریق جریان آغشته به فلورسنت از نازل و برخورد پرتوی لیزر با آن، ماده فلورسنت طول موج خاصی از نور نارنجی از خود منتشر می‌سازد که در فضای کاملاً تاریک اتاق توسط دوربین دیجیتال مجهز به پالایشگر (فیلتر) نارنجی ثبت می‌شود. دوربین دیجیتال نیز در عملکرد همزمان با آینه‌های نوسانی اقدام به تصویربرداری سریع از فرایند آزمایش می‌کند. به منظور کنترل دوربین و آینه‌های نوسانی و ذخیره همزمان تصویرها در رایانه، مجموعه‌ای از الگوریتم‌های کنترلی و یک برد رایانه‌ای خاص که توسط

اندازه‌گیری سرعت و روش‌های Laser Induced fluorescence (LIF)، Light Intensity (LI) و Attenuation (LA) جهت اندازه‌گیری پخشیدگی غلظت اشاره کرد. در این سامانه‌ها به ترتیب، با بهره‌گیری از پرتوهای لیزر متقاطع (LDV)، ذرات ریز قابل شناسایی با چشم غیرمسلح (PIV) و تزریق فلورسنت (LIF) و رنگ (LI and LA) امکان آشکارسازی سازی رفتار جریان و ثبت آن با دوربین دیجیتال از خارج محیط فراهم می‌شود. توسعه این سامانه‌ها همراه با توسعه دوربین‌های دیجیتال بسیار سریع و دقیق در سال‌های اخیر ثبت و تحلیل رقومی تصویرهای به دست آمده را با دقت بسیار بالا ممکن ساخته است. در این پژوهش در ادامه روند توسعه سامانه‌های دیداری، توسعه سامانه اسکن لیزری سه بعدی برای آشکارسازی رفتار جریانهای آغشته به فلورسنت که با همکاری شرکت دانش بنیان پرتونگار تجهیز امین و در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل طراحی و ساخته شده است معرفی می‌شود. همچنین توانایی‌های این سامانه در آشکارسازی رفتارهای پیچیده و سه بعدی جریان‌های آشفته و قابلیت‌های فراوان آن در بررسی‌های هیدرولیک محیط زیست بحث و بررسی می‌شود.

۲- سامانه اسکن لیزری سه بعدی

این سامانه در آزمایشگاه هیدرولیک محیط زیست دانشکده مهندسی عمران دانشگاه نوشیروانی بابل و در اتاقی به ابعاد ۳/۵ در ۵ متر که به صورت کاملاً تاریک طراحی و به رنگ سیاه مات رنگ شده، قرار گرفته است. این سامانه متشکل از یک مخزن آب به ابعاد ۱/۸۰ متر طول، ۱/۵ متر عرض و ۱ متر عمق، منبع کلرزدایی آب و تجهیزات هیدرولیکی مرتبط می‌باشد که به صورت نشان داده شده در شکل ۱ در اتاق تاریک جانمایی شده‌اند. برای کلرزدایی آب و پر کردن مخزن آزمایش، مخزن ۱۰۰۰ لیتری در گوشه اتاق تاریک قرار داده شده که از طریق پمپ و لوله‌های انتقال، امکان پر و خالی نمودن تانک آزمایش در مدت زمان کوتاهی را فراهم می‌سازد. بدنه مخزن از شیشه نشکن ساخته شده و در قابی فلزی به ارتفاع یک متر جانمایی شده است. از پمپ ۳۶۰ وات یک اینچی برای پر کردن مخزن آب استفاده می‌شود. سیستم تامین آب برای اطمینان به دسترسی آب

واقعی، تصحیح اثر بزرگنمایی ناشی از تغییر فاصله دوربین از صفحه آزمایش، حذف اعوجاج‌های هندسی و تغییرپذیری شدت نور در حاشیه و مرکز می‌باشد. در برنامه رایانه‌ای توسعه داده شده برای این منظور، بعد از پردازش اولیه تصاویر، میدان غلظت واسنجی شده و به داده‌های غلظت در مقیاس واقعی تبدیل می‌شود. میرایی نور لیزر در آب با قراردادن سلول واسنجی (کالیبراسیون) در دو موقعیت متفاوت و برآورد میزان شدت نور تنزیل یافته، اندازه هر نقطه تصویر در مقیاس واقعی با ثبت تصویر اشل، اثر هندسی بزرگنمایی لنز با اندازه‌گیری فاصله دوربین از صفحه لیزر و در نهایت تعیین غلظت فلورسنت در مقیاس واقعی برای هر نقطه با محاسبه شدت نور متناسب با هر غلظت در سلولهای واسنجی که با غلظت‌های مختلف محلول فلورسنت پر شده‌اند، انجام می‌گیرد. به این ترتیب، تصاویر برداشت شده و به مقیاس واقعی از مکان، زمان و غلظت تبدیل می‌شوند (Gungor and Roberts, 2009). آزمایش‌ها می‌توانند به صورت دو بعدی و یا سه بعدی برداشت شده و تصاویر پردازش شده در نهایت به صورت متغیر در زمان و یا میانگین زمانی تبدیل شوند. تصاویر پس از تحلیل و پردازش در نهایت در قالب خاصی که توسط نرم‌افزار Tecplote قابل بازشناسی است، ذخیره می‌شوند. از برتری‌های پردازش تصاویر و تبدیل آنها به فایل Tecplot، توانایی این نرم‌افزار برای برنامه نویسی، داده‌برداری در زمان امکان برش دستی و خودکار از مقطع در نقطه‌های مختلف و ساخت انیمیشن از رفتار جریان در محیط‌های متفاوت است. به این ترتیب با استفاده از تصاویر متغیر در زمان و توسعه مجموعه‌ای از دستورهای رایانه‌ای، می‌توان فیلم‌های متحرک از رفتار جریان پردازش شده در نماهای متفاوت به دست آورد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ثبت رفتار هندسی و اختلاطی جریان

سامانه‌های پیشتر توسعه داده شده در داخل کشور توسط Ahadian (2010)، Abessi et al. (2011a,b) و Shacheri (2014) بر روش‌های دیداری و تصویربرداری از جریان آغشته

دستورهای ویژه‌ای در برنامه Lab view برنامه‌ریزی شده است استفاده می‌شود. دوربین از نوع Mars با توان برداشت بیشینه ۳۰۰ فریم برثانیه و دقت تصویری ۶۴۰ در ۴۸۰ پیکسل است. دوربین دارای قابلیت تنظیم شدت نور ورودی، تمرکز و بزرگنمایی به صورت دستی می‌باشد. در نرم‌افزار کنترل کننده دوربین نیز میزان Exposure، Contrast، time و Brightness تصویر قابل کنترل و تنظیم می‌باشد. دوربین در فاصله کافی از مخزن آب قرار گرفته و برای هر آزمایش تصویراهایی با بسامد ۱۰۰ تصویر برثانیه برداشت می‌کند. این تصویرها از نوع خاکستری بوده که در آن شدت نور هر نقطه تصویر از سیاه مطلق تا سفید کامل در ۲۵۶ حالت مختلف متغیر می‌باشد. مجموعه تصویرهای خاکستری ثبت شده با ورود به مجموعه از برنامه‌های رایانه‌ای توسعه داده شده در نرم افزار ++C مورد پردازش رقومی قرار گرفته و در نهایت تصویرهای توسعه داده شده به شکل دو یا سه بعدی در نرم‌افزار Tecplot نمایش داده می‌شود.

حرکت صفحه‌های لیزر و اسکن سه بعدی و فرایند تصویر برداری با کنترل همزمان دوربین و لیزر به صورت خودکار بوده و توسط برنامه‌ای که در پردازشگر مرکزی توسعه داده شده انجام می‌گیرد. لیزر سبز رنگ و به طول موج 532 nm با توان ۱۰۰ میلی وات از نوع Diode-pump solid state Laser (DPSSL) کارت شبکه Multifunction DAQ (ADVANTECH company) Card¹، دوربین دیجیتالی از نوع Mars 640-300G 1/4" @ 4.8um و آینه‌های نوسانی از خارج از کشور خریداری شده و توسط گروه طراح به گونه‌ای سرهم و برنامه‌ریزی شده که در عملکرد همزمان با هم، امکان تصویربرداری سه بعدی از جریان سیال را فراهم سازد. تصویرهای برداشت شده یک دوره زمانی از تصویرهای خاکستری از موقعیت لیزر در زمان‌های مختلف در طول آزمایش هستند که لازم است با روش‌های پردازش رقومی تحلیل شوند. پردازش رقومی براساس آنچه پیشتر توسط Tian and Roberts, (2003) و Doviero et al. (2001) تشریح شده، شامل تصحیح میرایی شدت نور لیزر حین عبور از سیال، ارتباط اندازه نقاط تصویر به طول در مقیاس

¹ Model: PCIE-1816



Fig.1 A photo of the darkroom, water tank, camera, laser box, and control computer
 شکل ۱ نمایی از اتاق تاریک، مخزن آب، دوربین، جعبه لیزر و رایانه پردازشگر مرکزی

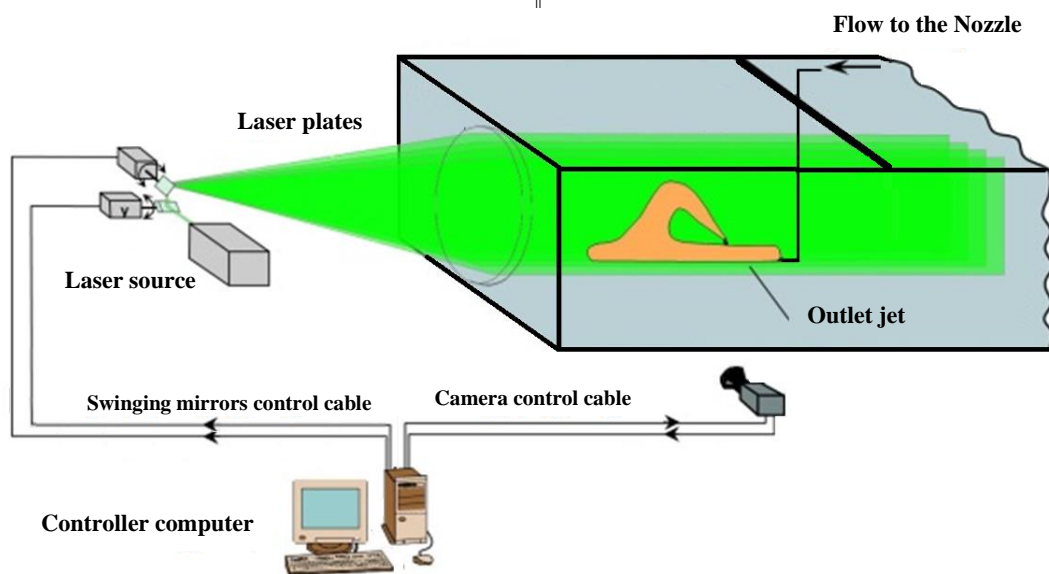


Fig. 2 The schematic of Three Dimensional Laser-Induced Fluorescence
 شکل ۲ نمایی کلی از اجزای سامانه اسکن سه بعدی لیزری

در نتیجه نبود امکان پردازش مقایسه‌ای تصویرها برای واسنجی میزان غلظت رنگ است. همچنین ثبت رفتار سه بعدی جریان به صورت یکپارچه شده در دو بعد، در عمل امکان تحلیل واقعی دو و سه بعدی جریان را ممکن نمی‌سازد. سامانه توسعه داده در این تحقیق مجهز به دوربین پرسرعت با قابلیت تنظیم دستی بازشدگی دیافراگم، تنظیم زوم، شدت نور، تضاد نور و زمان تماس نور با حسگر CCD است که امکان ثبت و پردازش مقایسه‌ای غلظت فلورسنت را

به رنگ در مقابل یک صفحه روشن استوار بوده‌اند. در این روش‌ها، به طور عمده رنگ قرمز و سیاه به عنوان آشکارساز به جریان اضافه شده و با دوربین‌های خودکار دستی رفتار جریان ثبت می‌شود. در سامانه‌های مورد اشاره (بالا) جریان سه بعدی در یک سطح دوبعدی یکپارچه شده و رفتار هندسی جریان از طریق فیلم‌برداری از جریان ثبت و ضبط می‌شود. محدودیت‌های این روش نبود امکان تحلیل شدت نور به دلیل تغییر خودکار مولفه‌های نوری دوربین و

می‌تواند برای تحلیل رفتار اختلاطی و پخشیدگی هندسی جریان استفاده شود. دقت آزمایش‌ها تابعی از دقت دوربین دیجیتال، دبی سنج و روند واسنجی است که قابل مقایسه با روش‌های سنتی که با تداخل در جریان همراه است، نمی‌باشد.

تصویرهای پردازش شده در واقع تصویر لحظه‌ای جریان است که با تواتر ۱۰۰ تصویر در ثانیه برداشت شده‌اند. افزون بر تصویرهای لحظه‌ای می‌توان از آزمایش‌ها در زمان میانگین‌گیری کرد تا الگویی کلی از رفتار میانگین جریان به دست آورد (شکل ۴-a و ۴-c). تصویرهای لحظه‌ای رفتار غیرماندگار جریان در زمان و تصویر میانگین زمانی تصویر ساختگی از رفتار کلی جریان در حالت ماندگار به دست خواهند داد. این تصویرها به این ترتیب با شرایط همانند خود در حل عددی مستقیم (DNS) و مدل‌سازی آشفتگی به روش میانگین رینولدز (RANS) قابل مقایسه خواهند بود. همچنین با کمک روش برداشت سه بعدی، بسیاری از رفتارهای جریان که ماهیتی سه بعدی دارند و پیشتر امکان مشاهده آنها نبوده را می‌توان آشکار کرد (Botelho et al., 2016; Abessi and Roberts, 2016). این روش افزون بر ثبت دو و سه بعدی هندسه و تغییرات غلظت جریان امکان تحلیل بسامدی رفتار گردابه جریان آشفته را نیز به گونه‌ای مطلوب فراهم می‌سازد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

۳-۲- ثبت و تحلیل آشفتگی در جریان

جریان آشفته غالب‌ترین نوع جریان در ابعاد مهندسی در طبیعت می‌باشد. جریان آشفته در واقع جریانی ناپایدار است که با ویژگی‌هایی چون بی‌نظمی بالا، انتشار، حضور گردابه و پخشیدگی زیاد شناخته می‌شود. به دلیل ذات چرخشی جریان آشفته، این جریان را می‌توان متشکل از گردابه‌های کوچک و بزرگ سه بعدی دانست که تشخیص ابعاد آنها به دلیل ماهیت تصادفی جریان آشفته به سختی امکان‌پذیر است. آشفتگی در اعداد رینولدز بالا (سرعت‌های زیاد) رخ می‌دهد و دراصل از مجموعه‌ای از نوسان‌های تصادفی در متغیرهای فیزیکی جریان تشکیل یافته است. در جریان‌های آشفته پارامترهای جریان رفتاری کاملاً تصادفی داشته و با

فراهم می‌سازد. در این سامانه همچنین با قراردادن صفحه لیزری در مرکز جت امکان ثبت آزمایشات به صورت دو بعدی و با اسکن سه بعدی حجم کنترل مشخصی از سیال، امکان ثبت رفتار سه بعدی جریان در طول زمان میسر شده است. در شکل ۳ نمایی واقعی از آزمایش دو بعدی که صفحه لیزری در مرکز جریان قرار گرفته، آورده شده است. تصویر سمت راست ناشی از برخورد لیزر با ماده ردیاب فلورسنت در جریان و تحریک آن به تابش نور در طول موج سبز رنگ تا نارنجی (nm 660-540) را نشان می‌دهد. در تصویر سمت چپ تصویر جریان پس از پالایشگر نارنجی که تنها اجازه عبور طول موج‌های nm 620-590 را می‌دهد، آورده شده است. این تصویر در مقیاس خاکستری ثبت و مورد پردازش رقومی قرار می‌گیرد. در شکل ۴ سمت راست تصویر سه بعدی بدست آمده از پردازش این آزمایش (بالا تصویر میانگین زمانی و پایین تصویر لحظه‌ای) آورده شده است. در سمت چپ این تصویر، نمایی دوبعدی از تغییر غلظت فلورسنت در خط مرکزی جریان (بالا تصویر میانگین زمانی و پایین تصویر لحظه‌ای) آورده شده است. نمونه‌هایی از ویدیوهای ساخته شده با این روش در سایت آپارات^۱ قابل مشاهده می‌باشد. به منظور تایید دقت این روش در ثبت و تعیین ویژگی‌های هندسی و اختلاطی جریان، یک جت ساده عمودی در محیط ساکن که حل نیمه تحلیلی و مشاهده‌های آزمایشگاهی متعددی از آن در دسترس است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور نتایج به دست آمده از آزمایش از طریق مقایسه نتایج مستخرج از فایل Tecplot با مشاهده‌های آزمایشگاهی گزارش شده در Fischer et al. (1979) و Webster et al. (2001) مقایسه شده است. ویژگی‌های هندسی جت اعم از خط مرکزی جریان، میزان عرض یا بازشدگی آن و تغییر غلظت جریان در امتداد خط مرکزی آن با مقادیر گزارش شده توسط محققان پیشین که به انواع روش‌های درجا (حسگرها یا نمونه برداری) به دست آمده است، مقایسه شده است. جزئیات بیشتر در Roberts and Abessi (2014) آورده شده است. به این ترتیب با واسنجی هر آزمایش، مقادیر هندسی و غلظت‌های مشاهده‌ای در مقیاس واقعی به دست آمده که

¹ <https://www.aparat.com/OzeairAbessi>

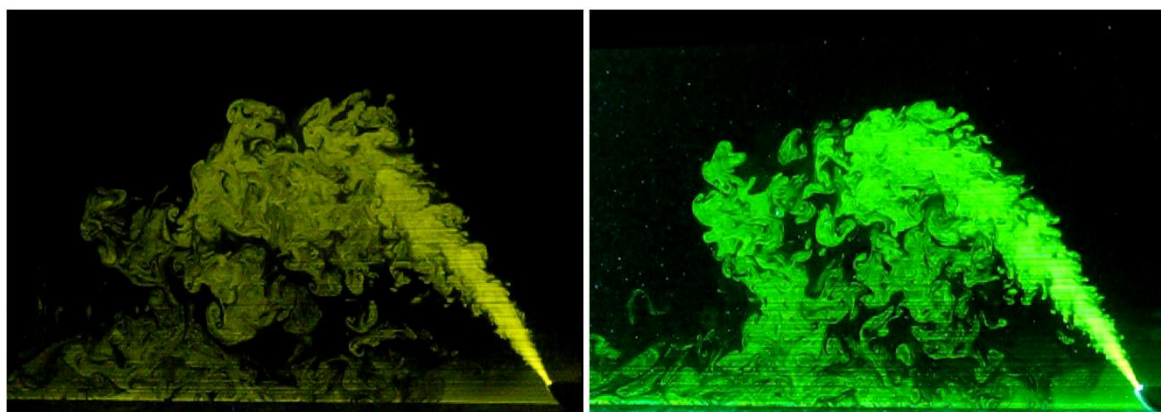


Fig. 3 The 2D illumination of 60 inclined dense jet due to laser sheet along the centerline.

شکل ۳ آشکارسازی دوبعدی جریان با شناوری منفی خروجی از نازل ۶۰ درجه توسط صفحه لیزری در مرکز جریان.

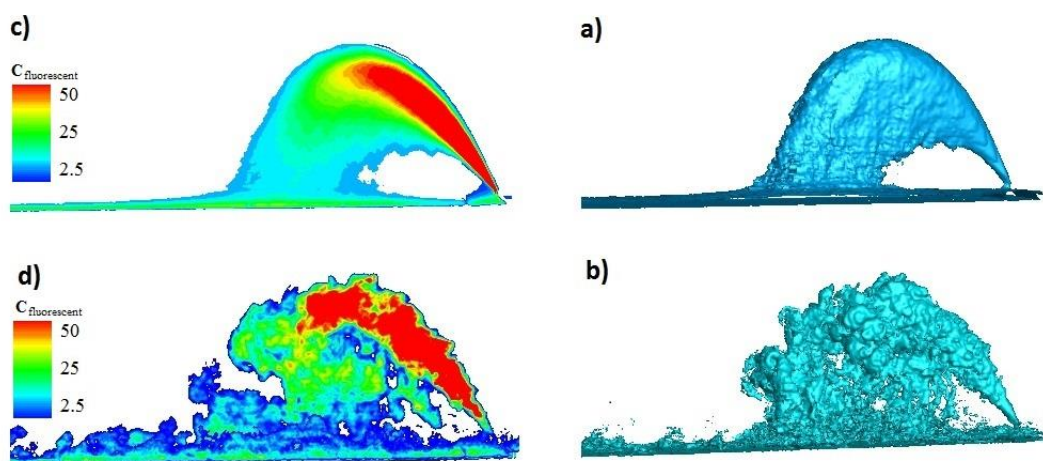


Fig. 4 An exhibition of the processed instantaneous and time-averaged photo of the inclined dense jet

a) 3D time average photo, b) 3D instantaneous photo

c) 2D time average photo, d) 2D instantaneous photo

شکل ۴ نمایی از تصویر پردازش شده لحظه‌ای و میانگین زمانی جت سنگین مایل

الف) تصویر میانگین سه بعدی، ب) تصویر لحظه‌ای سه بعدی ج) تصویر میانگین دو بعدی، د) تصویر لحظه‌ای دو بعدی

می‌شود در یک مدت زمان مشخص، بیشینه غلظت می‌تواند تا چند برابر بیشتر از غلظت میانگین باشد و کمترین آن برابر با صفر است. با توجه به شکل ۵ غلظت در هر نقطه برابر با مجموع غلظت میانگین و میزان نوسان غلظت در آن نقطه است.

$$C = \bar{C} + C' \quad (2)$$

که در آن، C' مولفه نوسانی غلظت یا همان میزان انحراف اندازه غلظت لحظه‌ای از میزان غلظت میانگین جریان در همان نقطه می‌باشد. بطور مشابه در جریان‌های آشفته، هر کمیت فیزیکی دلخواه (مانند سرعت، چگالی، دما و ...) را می‌توان به صورت جمع دو مولفه متوسط و مولفه نوسانی بیان کرد. این روش که تحت عنوان تجزیه رینولدز شناخته

زمان تغییر می‌کنند. در شکل ۵ به عنوان مثال، تغییر غلظت ماده ردیاب در یک نقطه ثابت از جت تخلیه شده در طول زمان ترسیم شده است. با توجه به رفتار تصادفی متغیرهای جریان به طور معمول در تحلیل جریان‌های آشفته از روش‌های آماری استفاده می‌شود (Ghayour et al., 2020). در جریان‌های آشفته، غلظت در یک نقطه ثابت حول یک مقدار مشخص نوسان می‌کند. اندازه غلظت میانگین، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\bar{c} = \frac{1}{T} \int_0^T c dt \quad (1)$$

که در آن T زمانی به مراتب بزرگتر از طولانی‌ترین زمان نوسان‌های قابل تصور در جریان است. همان‌طور که دیده

کولموگوروف^۴ یاد می‌شود ادامه می‌یابد. در نهایت انرژی جنبشی آشفتگی در پایین ترین سطح به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. به این ترتیب نوسان‌های آشفتگی، طیف گسترده ای از مقیاس‌ها را تشکیل می‌دهند که متناسب با اندازه گردابه‌ها می‌باشند. معمول ترین روش در ترسیم طیف انرژی جنبشی جریان‌های آشفته استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و تحلیل بسامدی آن به کمک سری فوریه می‌باشد. در سامانه توسعه داده شده با برداشت و پردازش رقومی تصویرها با تواتر ۱۰۰ تصویر بر ثانیه در نهایت امکان تحلیل بسامدی رفتار جریان‌های آشفته در گستره وسیعی از اعداد رینولدز فراهم می‌شود. برداشت نوسان‌های غلظت جریان در یک نقطه، در امتداد نیمرخ عرضی جریان و در طول مسیر به این ترتیب امکان توسعه و ترسیم نیمرخ شدت و قدرت آشفتگی، تناوب جریان، برش زمانی جریان و طیف انرژی جنبشی آشفتگی را فراهم خواهد ساخت. در شکل ۶ به عنوان نمونه طیف انرژی جنبشی جریان و برشی زمانی گردابه‌های جریان در نقطه اوج ارتفاع برای تخلیه مایل فاضلاب‌های سنگین به عنوان نمونه‌ای از تحلیل‌های عملی موجود در ارتباط با تفسیر جریان‌های آشفته به کمک این سامانه آورده شده است. همان‌طور که در طیف انرژی ترسیم شده (شکل ۶) مشاهده می‌شود، قانون عمومی شیب ۵/۳- در محدوده اینرسیایی میانی طیف انرژی به درستی مشاهده شده است.

می‌شود در واقع بیانگر آن است که قسمت نوسانی جریان کاملاً تصادفی بوده و با استفاده از نظریه‌های آماری می‌تواند بررسی و تحلیل شود. در جریان‌های آشفته، هر گردابه بسته به اندازه و ظرفیت خود از انرژی جنبشی موجود در جریان متوسط انرژی می‌گیرد. بزرگترین گردابه‌های موجود در جریان به این ترتیب وظیفه حمل و جابه جایی بخش عمده‌ای از انرژی جنبشی جریان متوسط را بر عهده دارند. از این‌رو بزرگترین گردابه‌ها بیشترین تاثیر بر روی دینامیک بخش متوسط جریان‌های آشفته و خواص آن را خواهند داشت. آبشار انرژی^۱ به انتقال انرژی از گردابه‌های بزرگ جریان به سمت گردابه‌های کوچک اطلاق می‌شود. در یک جریان آشفته گردابه‌های موجود، افزون بر آنکه نقش چشمه^۲ انرژی را برای گردابه‌های کوچک‌تر از خود ایفا می‌کنند، همزمان به عنوان چاه^۳ انرژی برای گردابه‌های بزرگ‌تر از خود به شمار می‌آیند. به این معنی که هر گردابه به این دلیل که مقداری از انرژی آشفتگی موجود در بطن خود را به گردابه‌های کوچک‌تر منتقل می‌کند، نقش منبع انرژی جنبشی آشفتگی را بازی کرده و به طور همزمان به این دلیل که از انرژی جنبشی جریان متوسط موجود در گردابه‌های بزرگ‌تر از خود تغذیه می‌کند، نقش چاه را برای انرژی جنبشی متوسط ایفا می‌کند. این روند تا انتقال انرژی به کوچک‌ترین گردابه‌های جریان که از آنها به عنوان گردابه‌های

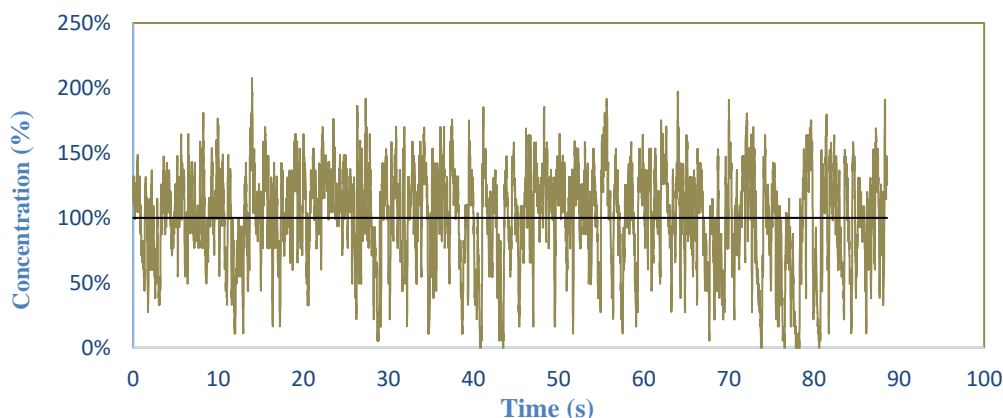


Fig.5 Concentration fluctuation at a point of flow centerline along the time

شکل ۵ نوسان‌های غلظت در یک نقطه از خط مرکزی جریان در طول زمان

³ Sink
⁴ Kolmogorov

¹ Energy Cascade
² Source

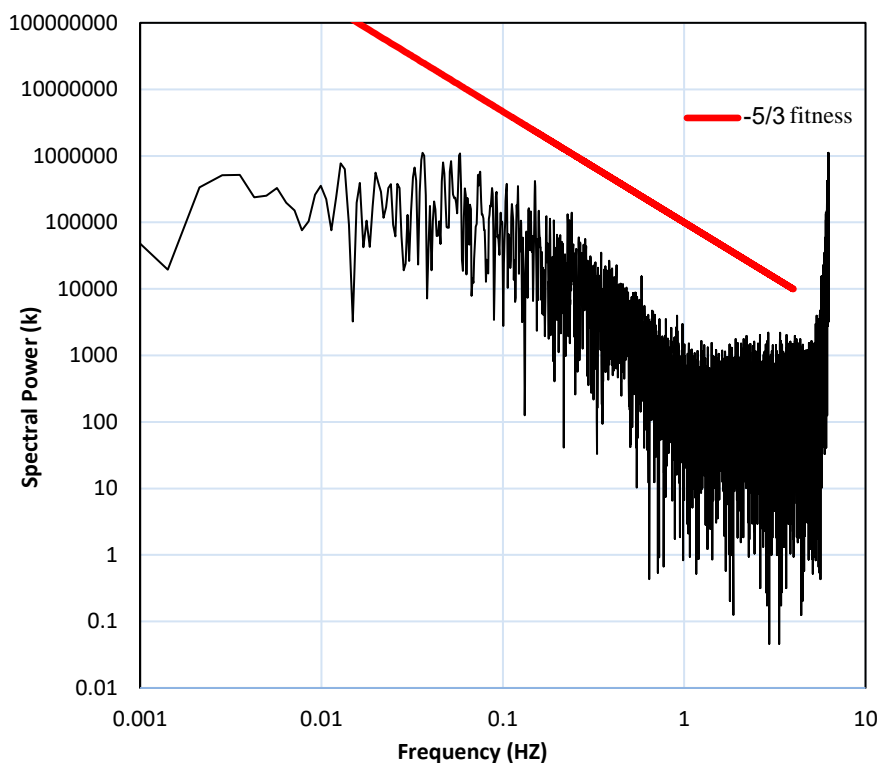


Fig. 6 The spectrum of turbulence kinetic energy at the location of jet maximum height
 شکل ۶ طیف انرژی جنبشی آشفتگی جریان در موقعیت اوج ارتفاع جت سنگین مایل

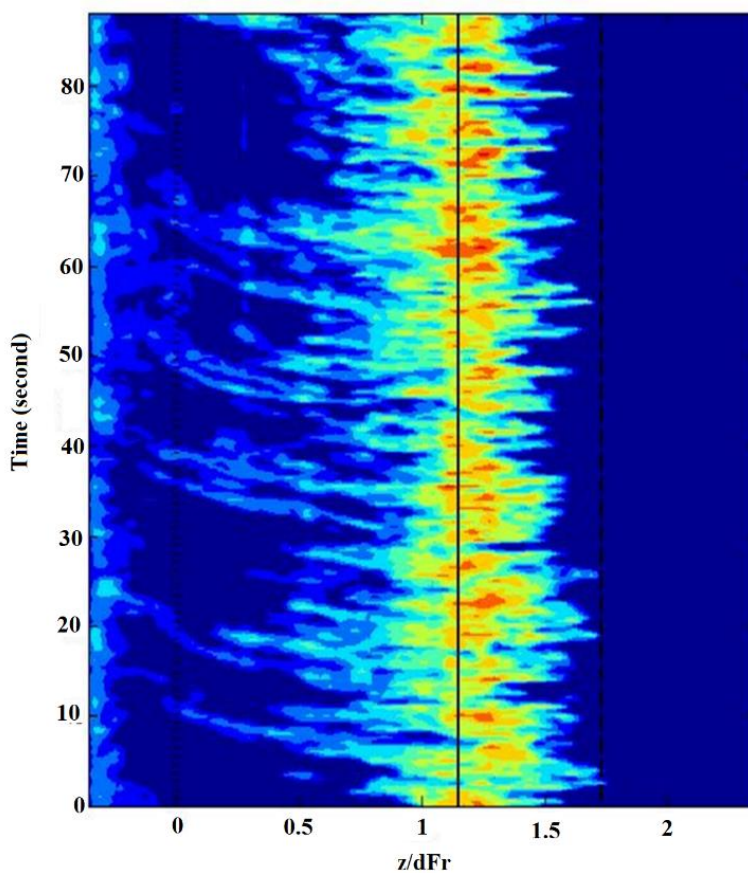


Fig. 7 Temporally-averaged concentration along the vertical cut at the location of jet maximum height
 شکل ۷ مقطع زمانی غلظت در برش عمودی امتداد نقطه اوج ارتفاع جت

۴- نتیجه گیری

توسعه سامانه اسکن لیزری سه بعدی که می تواند برای آشکارسازی رفتار دو و سه بعدی جریان در بررسی های هیدرولیک محیط زیست مورد استفاده قرار گیرد تشریح و قابلیت های آن معرفی شد. امکان ساخت این سامانه در سالهای اخیر و به جهت پیشرفت های جدید در حوزه فناوری های تصویربرداری و پردازش رقومی تصویرها ممکن شده است. این سامانه نسخه تکمیل شده نخستین سامانه سه بعدی دنیا است که پیشتر توسط پروفیسور Roberts و همکاران در موسسه فناوری جرجیا (جرجیاتک) امریکا توسعه داده شده است.

در نسخه تکمیل شده این سامانه، توانایی پردازش تصویرهای لحظه ای با نرخ بالای برداشت برای تحلیل بسامدی فرایند آشفته و نیز توسعه طیف انرژی جنبشی یا آبشار انرژی جریان های آشفته با توسعه مجموعه ای از برنامه های رایانه ای به زبان C++ به سامانه اضافه شده است. برنامه توسعه داده شده همچنین برای دریافت و پردازش داده های تصویری با پسوندهای متفاوت سازگار شده است. کاربرد گسترده این سامانه در تعیین ویژگی های هندسی، پخشیدگی و اختلاط جریان های خروجی از تخلیه کننده های دریایی پیشتر توسط Abessi و Roberts پژوهش های مختلف گزارش شده است (Abessi, and Robert, 2017; 2018). در سامانه توسعه داده شده کاربردهای جدیدتری برای پردازش داده های با بسامد بالا برای تحلیل آماری آشفته گی جریان اضافه شده است. تصویرهای بدست آمده در هر لحظه به جهت نرخ بالای برداشت می توانند برای مطالعه آماری فیزیک جریان های آشفته، تعیین نیمرخ قدرت و شدت آشفته گی و توسعه طیف انرژی در طیف گسترده ای از جریان های آشفته (اعداد رینولدز کوچک تا بزرگ) استفاده شوند. این سامانه محدودیت های ساختاری تنها نمونه پیشین در ارتباط با تحلیل بسامدی رفتار آشفته گی جریان را مرتفع کرده و قابل ارجاع برای استفاده در دیگر حوزه های علوم مهندسی و حتی پزشکی برای تحلیل جریان های لایه ای در ابعاد بسیار کوچک (میکرو) می باشد.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/98/390035 اعلام می دارند.

۶- فهرست نشانه ها

C	غلظت میانگین (kg.m^{-3})
C'	نوسان غلظت (kg.m^{-3})
t	زمان (s)

۷- منبع ها

Abessi, O. (2018). Sustainable Desalination Handbook, Chapter 7. Brine Disposal Management Planning Design and Implementation Gide, Elsevier Inc, Cambridge, MA 02139, United States.

Abessi, O., Roberts, P. J.W. and Ghandi, V. (2017). Rosette diffusers for dense effluents. J. Hydraulic Eng. 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.

Abessi, O. and Roberts, P.J.W. (2017). Rosette Diffusers for Dense Effluents in Flowing Currents. J. Hydraulic Eng., 144(1), 06017024.

Abessi, O. and Roberts, P.J.W. (2016). Multiport diffusers for dense discharge in flowing ambient water. J. Hydraulic Eng. 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001279, 04017003.

Abessi, O., Saeedi, M., Davidson, M. and Zaker, N. H. (2011). Flow classification of negatively buoyant surface discharge in an ambient current. J. Coastal Research, 28(1A), 148-155.

Abessi, O., Saeedi, M., Hajizadeh, Z.N. and Kheirkhah, G.H. (2011a). Flow Characterization Dilution in Surface Discharge of Negatively Buoyant Flow in Stagnant and Non-Stratified Water Bodies, J. water and waste water, 80. (in Persian)

Abessi, O., Saeedi, M., Hajizadeh, Z. N. and Kheirkhah, G.H. (2011b). Waste field characteristics, ultimate mixing and dilution in surface discharge of dense jets into stagnant water bodies. J. water and waste water, 81. (in Persian).

Abessi, O., Saeedi, M. and Hajizadeh Zaker, N. (2011). Prediction of flow regimes in surface discharge of negative buoyant effluents into non stagnated water. J. Oceanography, 1(4), 49-60. (in Persian)

Ahadiyan, J. (2010). Effect of Contraction Angle on Mixing Length in the Buoyant Jets Using Physical

- Roberts, P.J.W. and Abessi, O. (2014). Optimization of Desalination Diffusers Using Three-Dimensional Laser-Induced Fluorescence, Report Prepared for United States Bureau of Reclamation School of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology, Atlanta, 30332.
- Roberts, P.J.W., Ferrier, A. and Daviero, G.J. (1997). Mixing in Inclined Dense Jets. *J. Hydraulic Eng.*, 123(8), 693-699.
- Saeedi, M., Farahani, A.A., Abessi, O. and Bleninger, T. (2012). Laboratory studies defining flow regimes for negatively buoyant surface discharges into crossflow. *Environmental fluid mechanics*, 12(5), 439-449.
- Shafaei Bejestan, M. (2004). Principles and application of Physical –Hydraulic Models, Shahid Chamran University, Iran. (in Persian)
- Shacheri, F. (2014). A Comparative Study on Flow Geometrical and Mixing Characteristics of Negatively Buoyant effluent Surface Discharge from Rectangular and Trapezium Channels in to Stagnant Ambient, MSc Thesis, Tarbiat Modares University, Iran. (in Persian)
- Tian, X. and Roberts, P.J.W. (2003). A 3DLIF System for Turbulent Buoyant Jet Flows. *Expts. Fluids*, 35, 636-647.
- Webster D.R., Roberts, P.J.W. and Raad, L. (2001). Simultaneous DPTV/PLIF measurements of a turbulent jet. *Exp. in Fluids*, 30(1), 65-72.
- and Mathematical Model, PhD Thesis, Shahid Chamran University of Ahwaz. (in Persian)
- Botelho, D. A., Miller, N., Roberts, P., Obessi, O., Mohammadian, M., Wood, M., Shao, D.D., Bradley, J., Morelissen, R. and Law, A. W. K. (2016). *Marine Outfall Systems: Current Trends, Research and Challenges. Global Trends & Challenges in Water Science, Research and Management: a compendium of hot topics and features from IWA specialist groups* (2 ed., pp. 67–72). London, UK.
- Daviero, G.J., Roberts, P.J.W. and Maile, K. (2001) Refractive index matching in large-scale stratified experiments. *Exp Fluids*, 31, 119–126.
- Fischer, H. B., List, J. E., Koh, R. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, Inc., San Diego.
- Gungor, E. and Roberts, P.J.W. (2009). Experimental studies on vertical dense jets in a flowing current. *J. Hydraulic Eng.*, 135, 935-948.
- Ghayour, S., Hamidi M. and Abessi, O. (2020) Analysis of Turbulence Flow in Submerge Disposal of Brine in Coastal Desalination Plants, *J. Oceanography*, In press. (in Persian)
- <https://www.aparat.com/OzeairAbessi>.
- Roberts, P.J.W. (1979). Line plume and ocean outfall dispersion. *J. Hydraulic. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 105(4), 313–331.
- Roberts, P.J.W. and Tome, G. (1987). Inclined dense jets in flowing current, *J. Hydraulic Eng.*, 113(3), 323-341.