

# مدل‌سازی آزمایشگاهی انتقال و انتشار مونوکسید کربن در هوای داخل ساختمان

احمد حقگو<sup>۱</sup>، عزیر عابسی<sup>۲\*</sup>، علی رحمانی فیروزجائی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران  
A.haghgoo@yahoo.com  
۲. استادیار، عضو هیئت‌علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران  
Rahmani@nit.ac.ir  
۳. استادیار، عضو هیئت‌علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۸

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۱۰

## چکیده

در دنیای مدرن، انسان به‌طور متوسط حدود ۷۰-۹۰ درصد اوقات خود را در محیط‌های بسته می‌گذراند و بیشتر فعالیت‌های افراد در داخل چنین فضاهایی صورت می‌گیرد. وجود انواع آلاینده‌ها با غلظت بالا در فضای تنفسی انسان در خانه نقش تأثیرگذاری بر سلامت ساکنین دارد. بنابراین طراحی این فضاها بایستی به نحوی انجام گیرد که تضمین‌کننده تازگی و کیفیت مطلوب هوا در داخل ساختمان باشد. در این پژوهش، دینامیک انتقال و پخش پلوم آلودگی (گاز مونوکسید کربن) از منبعی نقطه‌ای در محیط‌های ساکن داخل ساختمان مورد مطالعه قرار گرفته است. پخش آلودگی در محیط، متأثر از تأثیر توأمان نیروهای شناوری و مونتوم و آشفتگی‌های ناشی از آن است. در مدل‌سازی انتشار گاز در هوای داخل ساختمان، به دلیل عدد ماخ پایین و تغییرات ناچیز فشار جریان، سیال را می‌توان تراکم‌ناپذیر فرض کرد. از این‌رو در این تحقیق آزمایش‌ها در محیط آبی و با استفاده از تکنیک لیزری آشکارسازی فلورسنت انجام گرفته است. با شبیه‌سازی آزمایشگاهی فرایند پخشیدگی جریان در محیط در نهایت مقادیر به دست آمده با مقادیر مجاز مونوکسید کربن در محیط مقایسه شد. در نتیجه ضرورت استفاده از تهویه مکانیکی به‌منظور ارتقای کیفیت هوای محیط مورد تأکید قرار گرفت.

## کلیدواژه

انتشار، انتقال، پلوم آلودگی، شبیه‌سازی آزمایشگاهی، LIF.

## ۱. سرآغاز

آلاینده‌ها هم در محیط‌های باز شهری و هم در محیط‌های بسته، به‌طور گسترده بر زندگی افراد تأثیرگذار هستند، به‌طوری که آلودگی هوا (کاهش کیفیت هوا) چهارمین عامل مرگ‌ومیر در جهان شناخته می‌شود که حدود دو سوم آن ناشی از آلودگی در محیط‌های سر بسته است (گیاث‌الدین، ۱۳۹۶). یکی از مهم‌ترین و خطرناک‌ترین گازهای تولید شده در منازل و محیط‌های بسته مونوکسید کربن است. این گاز بی‌رنگ، بی‌بو و فاقد طعم است و بر اثر احتراق ناقص زغال و سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود. میل ترکیبی مونوکسید کربن با هموگلوبین خون حدود ۲۲۰ برابر بیشتر از میل ترکیب گاز اکسیژن است. مولکول

افزایش جمعیت شهرها، تغییر در روند زندگی مردم و همچنین منابع بیشمار آلاینده هوا در محیط‌های بسته شهری، محیط‌زیست شهرها را با چالش‌های جدی و مداوم مواجه ساخته است. بحران آلودگی هوا تنها مربوط به زیر سقف آسمان شهرها و هوا در محیط‌های آزاد شهری نیست. سازمان‌های بهداشتی، آلودگی هوا در محیط‌های بسته و داخل خانه‌ها را بسیار جدی‌تر از آلودگی هوا در فضاهای آزاد عنوان کرده‌اند، چراکه غلظت برخی از آلاینده‌ها در داخل ساختمان می‌تواند تا ده‌ها یا حتی صدها برابر بیشتر از غلظت آن در محیط خارج باشد. این

مشاهده غلظت‌هایی از ۲۰,۰۰۰ ppm تا ۵۰۰,۰۰۰ ppm (۲ تا ۵۰ درصد) در احتراق مواد جامد و سوخت‌های مایع گزارش شده است (Sykes & Walker, 2016). حداکثر مقدار مجاز مونوکسیدکربن بر اساس استاندارد<sup>۱</sup>ASHRAE در محیط‌های صنعتی (۸ ساعت) ۵۰ ppm است ولی بسیار گزارش شده است که در کارگاه‌ها از سطح ۱۰۰ ppm هم تجاوز می‌نماید (ashrae.org).

به دلیل آثار منفی ذکر شده، شناسایی رفتار منبع آلودگی و مدل‌سازی انتقال و انتشار<sup>۲</sup> پلوم‌های تولیدی در محیط‌های بسته دارای اهمیت زیادی است. پلوم ستونی از سیال است که بر یکدیگر حرکت می‌کند. عوامل مختلفی سبب حرکت آلاینده‌ها در محیط می‌شود. ممتوم (نیروی اینرسی) و شناوری (ناشی از تفاوت چگالی) دو نیروی اصلی عامل ایجاد رفتار جت و پلوم شکل جریان در محیط هستند. جت و پلوم اگرچه از لحاظ ظاهری مشابه هستند اما تفاوت‌هایی ذاتی با هم دارند. جت به جریانی اطلاق می‌شود که رفتار آن تحت حاکمیت ممتوم اولیه باشد. در مقابل، پلوم به جریانی شناخته می‌شود که در آن نیروی شناوری حاکم بر رفتار جریان باشد. جت شناور به جریانی اطلاق می‌شود که در ابتدا ممتوم محور بوده اما به دلیل اختلاف چگالی با سیال پیرامون، پس از طی مسافتی با غلبه نیروی شناوری و استهلاك مومتوم، رفتار جریان تغییر کرده و پلوم شکل می‌شود. جریان با شناوری مثبت<sup>۳</sup> جریانی متشکل از توده‌های سبک‌تر از هوا است که به دلیل دمای بالاتر یا وزن مولکولی پایین‌تر، دارای چگالی کمتری نسبت به هوای محیطی که آن‌ها را احاطه کرده است.

مونوکسید کربن (CO) با عبور از غشاء مویرگی ریه و ترکیب با مولکول هموگلوبین (Hb)، کربوکسی هموگلوبین (COHb) که عامل کاهش ظرفیت انتقال اکسیژن به بدن است را ایجاد می‌کند. این امر باعث خواب‌آلودگی و احساس خستگی مفرط شده و می‌تواند انسان را بی‌هوش کند. در واقع کربوکسی که با مونوکسیدکربن تولید می‌شود، عاملی زیان‌آور برای سلامتی محسوب می‌شود (Lende, 1975).

مونوکسید کربن در غلظت‌های متفاوت آثار منفی متفاوتی بر سلامت انسان می‌گذارد. در جدول ۱ به برخی از آثار آن در غلظت‌های مختلف اشاره شده است. محققان بسیاری به بررسی آثار منفی مونوکسیدکربن بر سلامتی انسان پرداخته‌اند. Levy (۲۰۱۵) با مطالعه تأثیرات استنشاق مونواکسیدکربن بر سلامتی، این گاز را عامل اختلال در سیستم عصبی مغز در انسان‌ها، به‌ویژه کودکان معرفی کرد. از دیگر آثار زیان‌بار مونواکسیدکربن بر سلامتی به تشدید بیماری‌های قلبی ریوی، اثر بر سیستم اعصاب مرکزی، ایجاد اشکالات بینایی، تغییر در فعالیت قلب، تنفس، خستگی، خواب‌آلودگی، سردرد، کاهش هوشیاری، کاهش توانایی در انجام کار، آثار ژنتیکی، تولد کودکان نارس و کندذهنی، خفگی و حتی کما و مرگ اشاره شده است. استانداردها نشان می‌دهند، مقدار متوسط مونوکسید کربن برای هوای سالم در بازه زمانی ۲۴ ساعت برای مکان‌های مسکونی بایستی کمتر از ۱۰ ppm باشد. غلظت‌های مختلفی از مونوکسید کربن در بیشتر فرایندهای احتراق صنعتی تولید می‌شود. بنابراین در محیط‌های صنعتی این استانداردها متفاوت و کمی بالاتر است.

جدول ۳. اثرهای بهداشتی مونوکسید کربن (غیاث الدین، ۱۳۹۶)

مقدار (ppm)	مدت تماس	آثار
۹	۸ ساعت	حد استاندارد ملی
۵۰	۶ هفته	تغییر در ساختار قلب و مغز حیوانات
۵۰	۵۰ دقیقه	تغییر در دید و شفافیت نسبی
۵۰	۸-۱۲ ساعت	اختلالات عصبی

ناشی از تماس پرتوی لیزر با ماده فلورسنت، میدان غلظت جریان آشکار می‌شود. تصاویر حرکت توسط دوربین دیجیتال ضبط شده و سپس روی تصاویر، پردازش رقومی انجام می‌شود. اکثر تحقیقات صورت گرفته با روش LIF تاکنون مربوط به حرکت جریان در محیط‌های آبی بوده است. Roberts و همکاران (۱۹۹۷) با استفاده از روش LIF و ریز سنجنده‌های هدایت الکتریکی<sup>۴</sup> به مطالعه تخلیه فاضلاب با شناوری منفی در محیط‌های ساکن و لایه‌بندی نشده پرداخته‌اند. Shao و Law (۲۰۱۰) با انجام مطالعات آزمایشگاهی روی تخلیه کننده‌های تک مجرای، از روش LIF برای آشکارسازی رفتار جریان‌های چگال<sup>۵</sup> در محیط ساکن استفاده کردند. Roberts و Tian (۲۰۰۳) به منظور شبیه‌سازی آزمایشگاهی رفتار جریان فاضلاب در محیط، سامانه جدیدی به نام 3D-LIF<sup>۶</sup> را که به واسطه پیشرفت‌های اخیر فناوری ممکن شده است را به‌عنوان روشی کارآمد برای تحلیل رفتار سه‌بعدی جریان و محاسبه میزان ترقیق جریان تخلیه شده در محیط استفاده کردند. این سامانه با اتصال به دو رایانه برای کنترل و ثبت تصاویر، منبع تزریق پساب حاوی فلورسنت، منبع تابش لیزر یون-آرگون، دوربین دیجیتال سریع و نرم‌افزار پردازشگر تصاویر ذخیره شده، امکان اسکن و ثبت سه‌بعدی جریان‌ات آغشته به فلورسنت در حالات مختلف را ممکن ساخته است. این سامانه در تانک آبی به طول ۶٫۱ متر و عرض ۹۱ و عمق ۶۱ سانتی‌متر تعبیه شده و در پژوهش‌های بسیاری استفاده شده است. (Daviero et al. 2001; Abesi 2014, 2017, 2018)

توانایی سیستم LIF تنها به بررسی جریان‌های پیچیده در محیط‌های آبی خلاصه نمی‌شود و تاکنون دانشمندان متعددی برای مدل‌سازی رفتار جریان هوا با کمک آن، اقدام به شبیه‌سازی رفتار مشابه در محیط‌های آبی (تخلیه جریان آب در آب) کرده‌اند. Chen و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از یک مدل مقیاس کوچک با ابعاد یک‌دهم ابعاد

در داخل ساختمان در صورتی که میزان آلودگی ورودی کم باشد با استفاده از بازشوهای سقفی و تهویه طبیعی می‌توان بخشی از آلودگی را از محیط خارج کرد. در غیر این صورت بایستی از تهویه مکانیکی برای خارج کردن هوا و تهویه محیط استفاده کرد (Yu et al., 2007). فهم رفتار جریان در محیط در حالات مختلف، تنها با مدل‌سازی آزمایشگاهی (یا میدانی) و مدل‌سازی ریاضی (کامپیوتری) ممکن است. روش‌های موجود در ارتباط با مدل‌سازی کامپیوتری رفتار جریان عمدتاً مبتنی بر مدل‌سازی جریان با کمک مدل‌های عددی استوار است که به‌طور معمول توسط نرم‌افزارهای تجاری و تحقیقاتی اعم از فلوئنت و اوپن‌فوم انجام می‌شود. به دلیل هیدرولیک پیچیده جریان‌های آشفته و ماهیت روش‌های عددی، مدل‌سازی این پدیده‌ها از نظر محاسباتی می‌تواند بسیار پرهزینه بوده و با خطاهای زیادی همراه باشد. مدل‌سازی آزمایشگاهی و میدانی (مقیاس واقعی) نیز از جمله روش‌های معمول برای آشکارسازی رفتار جریان و ارائه روابط تجربی و ایجاد داده‌های مبنا (Benchmark) است. البته به دلیل هزینه بالا و پیچیدگی تجهیزات مورد نیاز مطالعات میدانی و آزمایشگاهی در این حوزه بسیار کمیاب است. در میان روش‌های آزمایشگاهی، مدل‌سازی جریان هوا از طریق شبیه‌سازی فرایند در داخل تانک آب تاکنون به‌صورت محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. به دلیل امکان اندازه‌گیری دقیق غلظت، سرعت و دبی جریان خروجی در سیالات مایع، انجام آزمایش‌ها مشابه در آب از روش‌های معمول برای مطالعه انواع جریان‌ات محسوب می‌شود.

در این تحقیق استفاده از سامانه لیزری آشکارسازی فلورسنت (LIF) که روشی برای تصویرسازی جریان سیال به کمک ماده ردیاب فلورسنت است بررسی شده است. در این روش از روی شدت نور گسیل شده در هر پیکسل

گراشف<sup>۸</sup> و پرانتل<sup>۹</sup> انجام گرفته که تئوری آن پیشتر در تحقیقات زیادی بسط داد شده است (Limane et al., 2015, Roberts (2017). در این زمینه براساس تحقیقات Toms (۱۹۸۷) در مطالعه دینامیک جریان‌های آشفته و شناور، با توجه به غلبه نیروی اینرسی بر لزجت و آشفته‌گی جریان، عدد فرود<sup>۱۰</sup> مهم‌ترین پارامتر مشخص‌کننده رفتار جریان است.

بررسی مطالعات گذشته بیانگر آن است که مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی در مقیاس کوچک برای مطالعه عملکرد تهویه در ساختمان‌ها بسیار دقیق، مؤثر و مقرون به‌صرفه است، از این رو می‌تواند به صورت جدی، گزینه‌ای برای جایگزینی یا صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی‌های کامپیوتری باشد. مدل‌سازی رفتار جریان هوا در تانک آب که پیشتر گزارش شده است دارای محدودیت‌ها و محسناتی است که استفاده آن برای مدل‌سازی جریان‌ات آشفته در مقیاس‌های کوچک و دقت‌های بالا را اقتصادی و عملی می‌کند (Livermore & Woods, Chen et al., 2010, 2007;). در مطالعه حاضر از توانایی‌های سیستم LIF و تئوری‌های موجود مبتنی بر امکان شبیه‌سازی رفتار جریان هوا در محیط‌های آبی در ابعاد کوچک، برای مطالعه انتقال و انتشار منوکسیدکربن در محیط‌های بسته در هندسه‌ای ساده استفاده شده است. در این پژوهش رفتار جریان در محیط ساکن داخل ساختمانی سوله شکل (کارگاه صنعتی) در شرایط عدم وجود باد (تهویه طبیعی) یا هر گونه تهویه مصنوعی، مطالعه شده است (شکل ۱). سوله کارگاهی مورد مطالعه در ابعاد کوچک مقیاس شده و رفتار جریان خروجی به شکل پلومی از آلودگی که در گوشه راست آن جانمایی شده مورد آزمایش قرار گرفته است. در ادامه مشخصات جریان و ساختمان مورد مطالعه با جزئیات بیشتری آورده شده است.

واقعی، به منظور شبیه‌سازی آثار اجزای متحرک در الگوی جریان هوا و انتشار آلودگی در داخل کابین هواپیما، اقدام به مدل‌سازی آن با شبیه‌سازی تخلیه جریان در داخل تانک آب کرده و به این ترتیب الگوی رفتاری جریان را مورد مطالعه قرار داده‌اند. این محققان یک کابین نیم دایره‌ای با قطر داخلی ۰/۴۵ متر و طول ۲/۴۳ متر بود با ۲۸ ردیف صندلی که به‌طور کامل در مخزن آب مستغرق شده را برای تعیین الگوی تهویه در کابین مورد استفاده قرار داده‌اند. انتقال آلودگی داخل کابین هواپیمای مقیاس شده در ابعاد کوچک در این تحقیق با استفاده از تکنیک آشکارسازی فلورسنت توسط لیزر صفحه‌ای (PLIF) بررسی شده است. در این تحقیق علاوه بر آشکارسازی رفتار عمومی جریان میزان ترقیق و اختلاط جریان هوا نیز بررسی شده است.

Livermore و Woods (۲۰۰۷) برای مطالعه تهویه طبیعی ساختمانی با گرمایش در سطوح مختلف، از مخزن آکرلیک کوچکی با ابعاد ۳۱ سانتی‌متری پر از آب استفاده کرده‌اند. آن‌ها توزیع رژیم جریان و گرمای ساختمان را با استفاده از سیستم آنالوگ<sup>۷</sup> ثبت داده‌ها را بررسی و مطالعه کرده‌اند. Mingotti و همکاران (۲۰۰۱) تهویه طبیعی یک نمای دو طرفه به اتاق، در ساختمانی چند طبقه را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. اتاق مورد بررسی شامل منبع حرارتی افقی توزیع شده بوده که به‌طور مشابه با ساکنان در یک دفتر باز یا یک سیستم گرمایش از کف در نظر گرفته شده است.

در شبیه‌سازی رفتار جریان در ابعاد کوچک معمول است برای ایجاد شباهت بین مدل آزمایشی با یک ساختمان یا اتاق در ابعاد واقعی، پارامترهای هندسی و نیروهای حاکم در مدل با مقادیر مشابه در ساختمان واقعی متناسب باشند. تشابه نیروها در شبیه‌سازی جریان هوا در مدل‌های آزمایشگاهی مقیاس کوچک با ابعاد واقعی می‌تواند با استفاده از یکسان‌سازی اعداد بی‌بعدی چون رینولدز، فرود،



شکل ۱. الگوی شماتیک از رفتار عمومی پلوم آلودگی در هوای ساکن داخل ساختمان

به سرعت‌های پایین سیال در مقایسه با سرعت صوت، سیال را می‌توان تراکم ناپذیر فرض کرد. تراکم ناپذیر بودن جریان به این معنا است که تغییرات فشار در جریان بسیار کم است. در این صورت اختلاف چگالی، عامل حرکت سیال است. به بیان دیگر مادامی که هوا با سرعت کم جریان می‌یابد، تغییر در چگالی، مقدار کمی است لذا جریان را می‌توان با دقت خوبی تراکم ناپذیر فرض کرد. به‌منظور برقراری تشابه دینامیکی در ارتباط با نیروهای اصلی حاکم در مدلسازی جریان هوا در قالب سیستم آبی لازم است نسبت اختلاف چگالی منبع تخلیه و سیال محیط در هوا و مدل آزمایشگاهی در آب بر اساس عدد فرود (رابطه ۱) مشابه هم باشد:

$$Fr = \frac{V^2}{g' L} \quad (1)$$

با فرض برابر بودن نسبت‌های طولی  $(\frac{L_P}{L_M} = 1)$ ، نسبت سرعت‌ها  $(\frac{V_P}{V_M} = \sqrt{\frac{L_P}{L_M}} = 1)$  و شتاب ثابت ثقل  $(g)$ ، تنها بایستی شتاب اصلاح شده گرانش سیال شناور در نمونه واقعی با آزمایشگاهی برابر باشد. برای نمونه‌ای واقعی، با فرض چگالی هوای محیط  $1/2$  کیلوگرم بر مترمکعب (در دمای  $25$  درجه و فشار  $1$  بار) و چگالی پلوم گاز کربن مونوکسید  $1/14$  (با غلظت  $20,000$  ppm) در شرایط مشابه برای آب با چگالی  $998$  کیلوگرم بر مترمکعب، طبق رابطه (۲) خواهیم داشت:

## ۲. مواد و روش‌ها

برای مدلسازی رفتار واقعی جریان لازم است که شناخت دقیقی از رفتار فیزیکی جریان داشت. به همین منظور، در این بخش به بررسی معادلات حاکم، محدودیت‌های موجود برای ساخت مدل آزمایشگاهی، امکانات و مصالح موجود، وسایل و دستگاه‌های اندازه‌گیری و برنامه آزمایش‌ها پرداخته شده است.

### ۱-۲. تئوری تحقیق

در مکانیک سیالات، مدلسازی آزمایشگاهی پدیده‌ها در ابعاد کوچک بر اساس نیروهای حاکم انجام می‌شود. در مدلسازی پلوم آلودگی، به دلیل مومنت اولیه ناچیز و سبکی جریان ناشی از جرم مولکولی کمتر گاز خروجی و اختلاف دمای آن با محیط، این نیروی شناوری است که غالب بوده و تعیین کننده رفتار جریان در محیط است. در این پژوهش با توجه به فیزیک مسئله و مطالعات مشابه انجام شده، به دلیل اختلاف چگالی پلوم آلودگی با سیال محیط و وجود آشفته‌گی در جریان، می‌توان استنتاج کرد که دو نیروی اینرسی و ثقل غالب بوده و از تأثیر نیروی لزجت در مقابل این دو نیرو می‌توان صرف نظر کرد. به این ترتیب عدد فرود، عدد بی بعد حاکم بوده که می‌تواند برای شبیه‌سازی دینامیکی جریان استفاده شود. از طرفی با توجه

$$g'_{Air} = g'_{Model} \Rightarrow \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0} g\right)_{Air} = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0} g\right)_{Model} \Rightarrow -\left(\frac{\rho_{CO} - \rho_{0Air}}{\rho_{0Air}}\right)_{Air} = \left(\frac{\rho - \rho_{0Water}}{\rho_{0Water}}\right)_{Model}$$

$$\Rightarrow -\left(\frac{1.14 - 1.2}{1.2}\right) = \frac{\rho - 998}{998} \Rightarrow \rho = 1047.9 \frac{kg}{m^3} \quad (2)$$

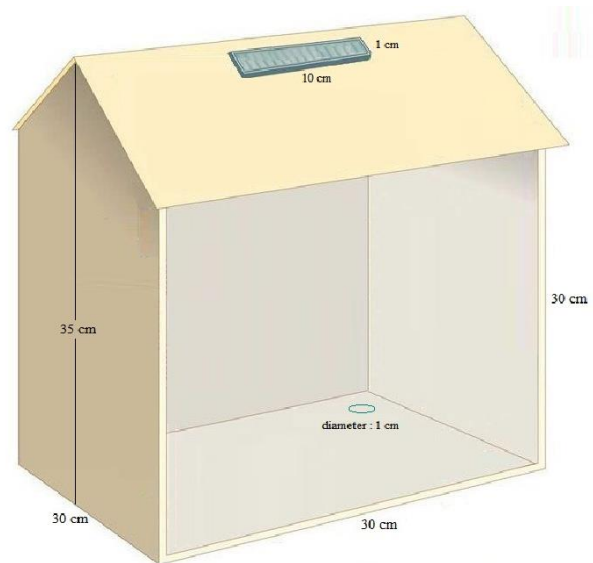
کف ساختمان به قطر ۱ cm است که جریانی با سرعت ۱۰ سانتی متر بر ثانیه و غلظت CO برابر با ۲۰,۰۰۰ ppm را در محیط تخلیه می‌کند. دریچه‌ای برای تهویه طبیعی و خروج هوا در سقف سوله به ابعاد ۱۰ × ۱ cm در نظر گرفته شده است. دمای محیط، نزدیک به دمای تعادل بدن انسان و ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده و جریان خروجی به صورت هم‌دم با محیط انتخاب شده است.

مدل ساختمان از جنس پلکسی‌گلاس<sup>۱۱</sup> به قطر ۳ میلی‌متر و به ابعاد ۳۰ × ۳۰ × ۳۵ ساخته شده است که به دلیل شفافیت امکان مشاهده رفتار جریان فلورسنت که با لیزر آشکار شده را فراهم می‌سازد. پلکسی‌گلاس ضمن شفافیت مناسب به دلیل مزایایی از جمله عدم شکنندگی، قابلیت ارتجاعی و شکل‌دهی مناسب با حرارت، در این تحقیق جایگزین شیشه شده است.

در این رابطه  $\rho$  چگالی پلوم آلودگی (پلوم مایع) در مدل آزمایشگاهی است که برای یکسان‌سازی شرایط بین جریان واقعی در هوا و مدل همان جریان در آب برابر با  $1047.9 \frac{kg}{m^3}$  برآورد شده است. به این ترتیب به منظور رسیدن به چگالی فوق، میزان شوری آب جریان آغشته به فلورسنت در مدل جانمایی شده در تانک آب می‌بایست برابر  $\frac{gr NaCl}{l}$  ۶۵ باشد. شایان ذکر است به دلیل مخالف بودن راستای نیروی گرانشی عدد منفی یک در آن ضرب گشته است. به این معنی که با معکوس کردن هندسه در منبع، تخلیه از بالا به سمت پایین انجام می‌شود.

## ۲-۲. مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش به منظور بررسی رفتار پلوم منوکسیدکربن (CO) از منبعی نقطه‌ای در هندسه کارگاهی سوله‌ای شکل با سقف شیب‌دار، ابعاد ساختمان به صورت شکل زیر انتخاب شده است. منبع ورود آلودگی، مجرای دایره‌ای در

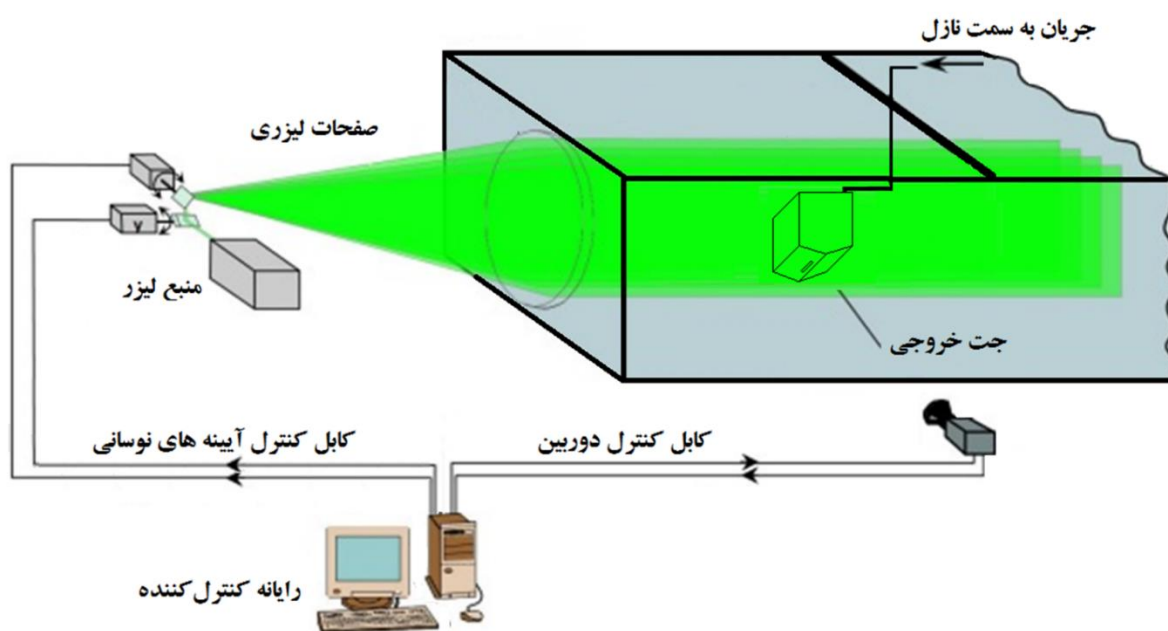


شکل ۲. راست هندسه مورد مطالعه، چپ) مدل آزمایشگاهی ساختمان از جنس پلکسی‌گلاس

(<sup>۱۴</sup>NITLIF) که برای این منظور توسعه داده شده، مورد تحلیل و پردازش رقومی قرار گرفته است. این سیستم نمونه کوچکی از سامانه سه‌بعدی LIF در مؤسسه فناوری جرجیا آمریکا است که توسط Tian, Roberts و عابسی توسعه داده شده و تکمیل شده است. در شکل ۳ تصویری کلی از مکانیزم مدل‌سازی و تجهیزات مورد استفاده نشان داده شده است (عابسی و همکاران ۱۳۹۸).

### ۳-۲. مدل‌سازی در آزمایشگاه

شبیه‌سازی آزمایشگاهی با هدف شناسایی رفتار پلوم گاز CO در آزمایشگاه تحقیقاتی هیدرولیک محیط‌زیست دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل و با استفاده از سیستم 3D-LIF انجام گرفته است که مجهز به تجهیزات ثبت تصاویر در زمان <sup>۱۲</sup> است. در این سیستم، نور گسیل شده از فلورسنت بعد از آشکارسازی توسط لیزر در اتاق تاریک، توسط دوربین CCD <sup>۱۳</sup> ثبت و به سرور مرکزی انتقال داده می‌شود. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار پردازشگر



شکل ۳. نمایی کلی از اجزای سامانه اسکن لیزری سه‌بعدی آشکارسازی فلورسنت

رودامین 6G<sup>۱۶</sup> با غلظت  $200 \mu\text{gr}/L$  است. طبق محاسبات، چگالی محلول  $1047/4 \text{ kg}/m^3$  انتخاب شده که این امر با حل نمک کلرید سدیم به غلظت  $65 \text{ gr NaCl}/l$  ایجاد شده است. در طول انجام آزمایش، عکس‌برداری با هم‌زمانی<sup>۱۷</sup> عملکرد دوربین و لیزر انجام گرفته است. در برخورد پرتوی لیزر به جریان آغشته به فلورسنت در فضای کاملاً تاریک اتاق آزمایش، دوربین نور برانگیخته‌شده از فلورسنت بر اثر تماس با لیزر را ثبت می‌کند. لنز دوربین مورد استفاده برای نگاهت تصاویر مجهز به پالایه<sup>۱۸</sup> خاص نوری<sup>۱۹</sup> است که طول موج نور

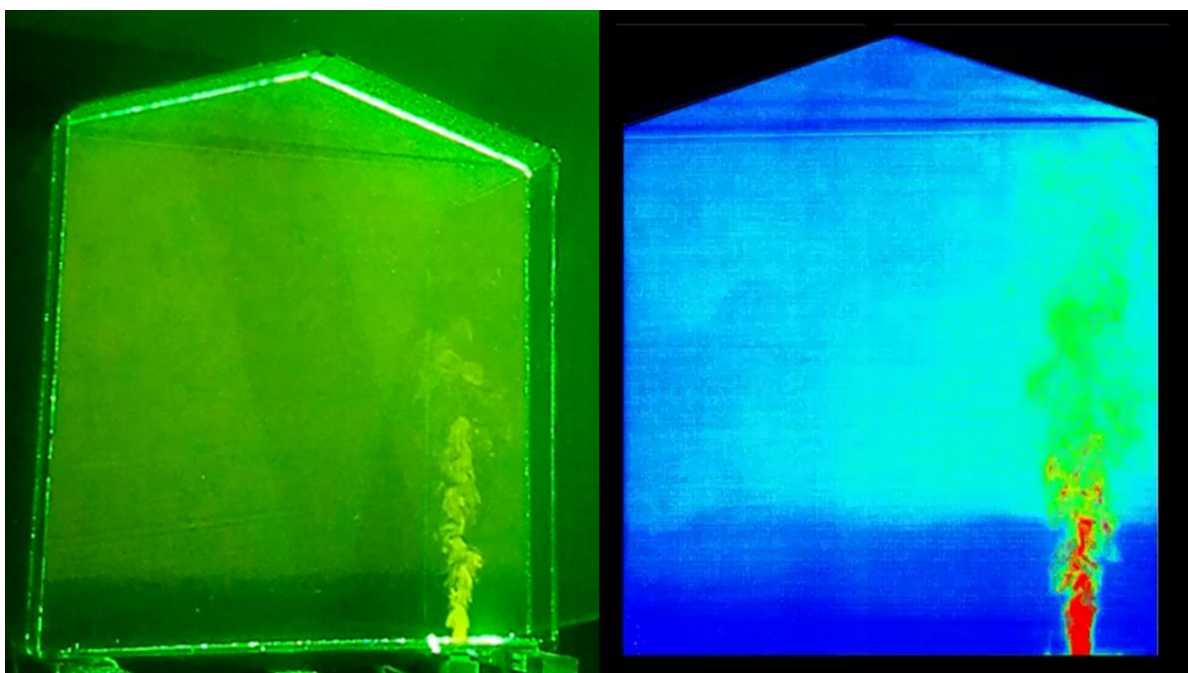
انجام آزمایش در محیط مملو از آب انجام گرفته، از این رو محفظه شفاف ساخته‌شده از ساختمان موردنظر در داخل تانک پر شده از آب قرار داده شده است. جریان آلاینده ورودی آب با شوری  $l$  ۶۵ است که در یک مخزن زوک<sup>۱۵</sup> ساخته شده و توسط پمپ ۰/۵ واتی و با کنترل سرعت توسط دبی‌سنج به درون محفظه آزمایش تخلیه می‌شود. مقدار دبی ورودی  $28 \text{ L/hr}$  و سرعت ورودی  $0/1 \text{ m/s}$  است. عدد رینولدز جریان ورودی ۱۱۲۴ است. پلوم آلودگی شامل ماده ردیاب فلورسنت با نام

فلورسنت) در یک نقطه و نیز سلول واسنجی حاوی فلورسنت یکسان در دو جایگاه متفاوت انجام گرفته است. بدین منظور طی فرایند کالیبراسیون، نرم‌افزار توسعه داده شده برای پردازش تصاویر، اطلاعات واقعی به دست آمده از میرایی نور در پردازش تصاویر به مقادیر میدان واقعی مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت طی فرایندهای پیچیده پیش و پس پردازش، تصاویر برداشت شده به مقیاس واقعی از مکان، زمان و غلظت تبدیل شد. تصویرهای پردازش شده را می‌توان در زمان میانگین‌گیری کرد و با کنار هم قراردادن آن‌ها در نهایت تصویرهای دوبعدی و سه‌بعدی میانگین از رفتار جریان را برای استفاده در نرم‌افزارهایی چون Tecplot ایجاد کرد (شکل ۴). با میانگین‌گیری از تصویرها می‌توان الگویی کلی از رفتار متوسط جریان به دست آورد. البته امکان تفسیر رفتار جریان به صورت متغیر در زمان با کنار هم قرار دادن تصاویر لحظه‌ای نیز وجود دارد. در ادامه برای واکاوی رفتار و پخشیدگی جریان و نیز تعیین مسیر حرکت و الگوی جریان از فایل‌های پردازش شده نهایی در محیط Tecplot استفاده شده است.

لیزر را فیلتر کرده و تنها طول موج خاصی که بر اثر برخورد لیزر با ماده فلورسنت و برانگیخته شده آن ایجاد می‌شود را از خود عبور می‌دهد. تصاویر ثبت شده از نوع مقیاس خاکستری<sup>۲۰</sup> است که در آن شدت روشنایی هر پیکسل از سیاه مطلق تا سفید مطلق در ۲۵۵ حالت مختلف ثبت شده است.

تصاویر برداشت شده تنها زنجیره زمانی از تصاویر خاکستری در زمان‌های گوناگون است، از این رو تصاویر با استفاده از نرم‌افزار NITLIF که عمل پردازش رقومی را انجام می‌دهد، طبق روندی پیچیده از نظر هندسی و شدت نور متناسب با غلظت‌های خاص کالیبره شده و مورد واکاوی قرار می‌گیرد. برای این منظور مشابه آنچه پیشتر توسط Daviero و همکاران (۲۰۰۱) تدوین شد، در مجموعه کدهای توسعه داده شده، میرایی نور لیزر حین عبور از سیال، آثار هندسی فاصله دوربین از مرکز آزمایش و تغییرات شدت نور با غلظت از طریق فرایند کالیبراسیون<sup>۲۱</sup> پیچیده در تحلیل تصاویر لحاظ شده است (Daviero et al., 2001).

برآورد میزان میرایی پرتوی لیزر در آب با قرار دادن سلول واسنجی (دربرگیرنده آب با غلظت‌های متفاوتی از



شکل ۴. تصویری از مقطع جریان در حین آزمایش و تصویر پردازش شده برای دو آزمایش متفاوت



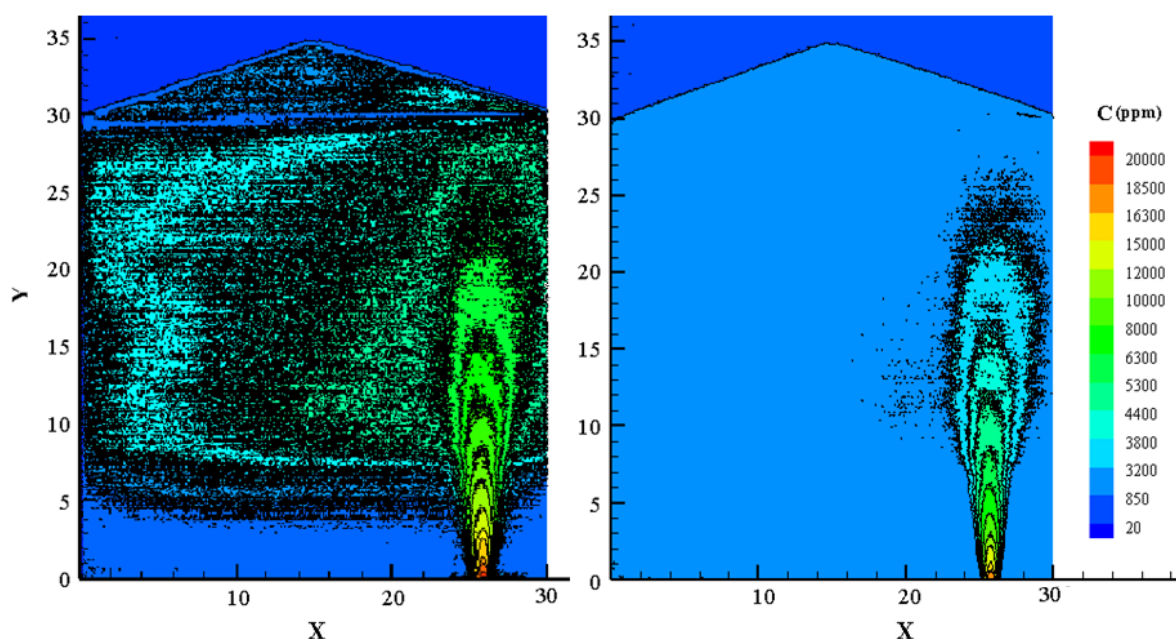
مقیاسی با توجه به غلبه عدد فرود به صورت  $\frac{T_P}{T_M} = \sqrt{\frac{L_P}{L_M}}$  ، با مجذور نسبت مقیاس‌ها نسبت دارد. برای سرعت جریان نیز مشابه نسبت  $\frac{V_P}{V_M} = \sqrt{\frac{L_P}{L_M}}$  برقرار است. میزان اختلاط و رقیق‌سازی آلودگی در محیط مستقیماً تحت تأثیر سرعت جریان پلوم است و هرچه این سرعت بیشتر، میزان پخشیدگی بیشتر بوده و در پی آن اختلاط و ترقیق افزایش خواهد یافت.

### ۳-۱. پروفیل‌های عرضی جریان

جریان سیال با خروج از منبع، تحت دو ناحیه مجزا در داخل محیط پذیرنده پیشروی می‌کند. به محض خروج جریان، آشفتگی ایجاد شده بر اثر گرادیان سرعت در مرزهای جریان با طی بخش کوتاهی از مسیر، خود را به مرکز پلوم رسانده و کل پیکره آن را در برمی‌گیرد. این ناحیه که مرحله نخست حرکت جریان در محیط تلقی می‌شود، تحت عنوان ناحیه شکل‌گیری جریان (ZFE) شناخته می‌شود که طی آن جریان خروجی دارای پروفیل سرعت و غلظت مشخصی نیست.

### ۳. نتایج

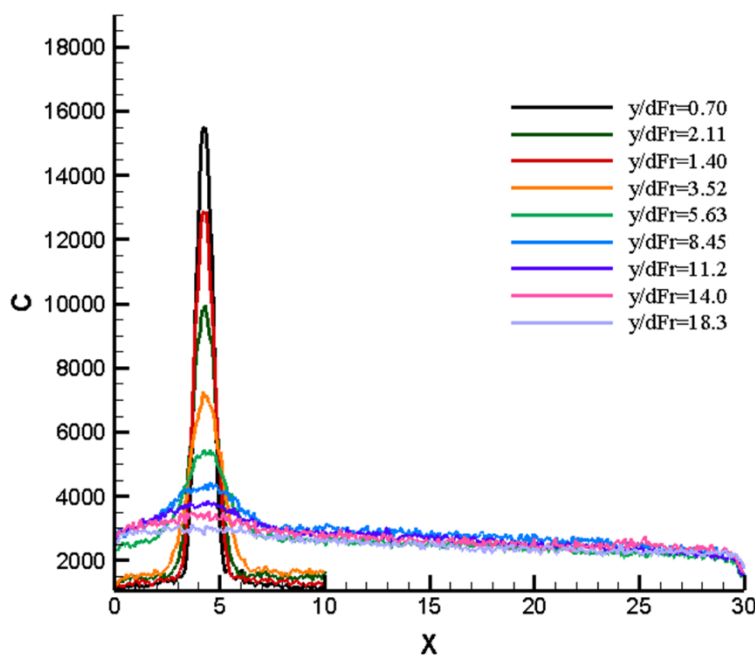
نتایج تحقیق حاضر در قالب نمودارهایی حاوی پروفیل‌های خود همسان نیم‌رخ‌های عرضی غلظت، تغییرات عرض پلوم و ترقیق جریان در امتداد خط مرکزی و نیز پخشیدگی جریان در محیط آورده شده است. آزمایش سه بار در حالت ماندگار برای جریانی با فرود  $Frd=1.44$  و چگالی  $\rho = 1.14 \text{ kg/m}^3$  انجام و ثبت شده است. در این آزمایش همان‌طور که انتظار می‌رود با گذشت زمان رفتار جریان به حالتی پایا می‌رسد، رفتاری که در آن تغییرات غلظت و الگوی جریان دیگر با زمان تغییر نمی‌کند. در شکل ۵ مسیر حرکت و پخشیدگی پلوم برای جریان فوق آورده شده است. غلظت متوسط آلودگی حین حرکت به سمت بالا و با دوری از منبع به دلیل آشفتگی شکل گرفته و اختلاط با سیال محیط به تدریج کاهش یافته و ترقیق می‌یابد. با توجه به مشخصات ساختمان و تحت تأثیر ابعاد دریچه خروجی سقف، جریان در نهایت پس از مدت ۵۰ ثانیه به حالت ماندگار می‌رسد. فرایند ثبت تصاویر میانگین‌گیری آن، از این زمان به بعد انجام شده تا تصویر میانگینی از حالت ماندگار جریان به دست آید. این زمان برای ابعاد فوق، با شرایط واقعی در هوا برابر بوده و از نظر



شکل ۵. پلوم پخشیدگی جریان بعد از کالیبراسیون،  $Frd=1.44$  و  $\rho = 1.14 \text{ kg/m}^3$

تعیین می‌شود. این پروفیل‌ها خودهمسان هستند به این معنی که، پروفیل‌های غلظت در نقاط مختلف جریان، دارای شکل و الگویی مشابه هستند و چنانچه نرمال شوند روی همدیگر قرار خواهند گرفت. این منحنی‌ها الگوی عمومی تغییرات غلظت جریان در عرض یا نحوه پخشیدگی عرضی جریان در محیط را نشان می‌دهند. در شکل ۶ تغییرات غلظت جریان در عرض ساختمان (بین دیواره راست و چپ) در فواصل مختلف از منبع جریان (مقادیر متفاوت  $\frac{y}{d.Fr}$ ) ترسیم شده است. با مقایسه این پروفیل‌ها با یکدیگر، نحوه کاهش غلظت و ترقیق و افزایش بازشدگی جریان در امتداد مسیر آن به خوبی مشاهده می‌شود.

در انتهای این ناحیه با پیشروی آشفته‌گی به سمت مرکز پلوم، به تدریج یک پروفیل غلظت مشخص در عرض جریان شکل می‌گیرد. این پروفیل در واقع میانگین نوسانات شکل گرفته در عرض جریان است. به این ترتیب با رسیدن کامل آشفته‌گی از لبه مرزها به مرکز جریان، ناحیه شکل‌گیری جریان، پایان یافته و محدوده دیگر جریان تحت عنوان ناحیه جریان توسعه یافته (ZEF) آغاز می‌شود. میانگین تغییرات عرضی غلظت جریان در این محدوده به صورت زنگوله‌ای شکل است. تغییرات زنگوله‌ای پروفیل غلظت به خوبی بر معادله گوسی<sup>۲۲</sup> برازش می‌یابد. با استخراج پروفیل‌های در برش‌های مختلف از جریان در امتداد مسیر و برازش<sup>۲۳</sup> گوسی بر آن، پارامترهای معادله



شکل ۶. نمودار غلظت برای مقادیر بی بعد فاصله از منبع تخلیه  $\frac{y}{d.Fr}$

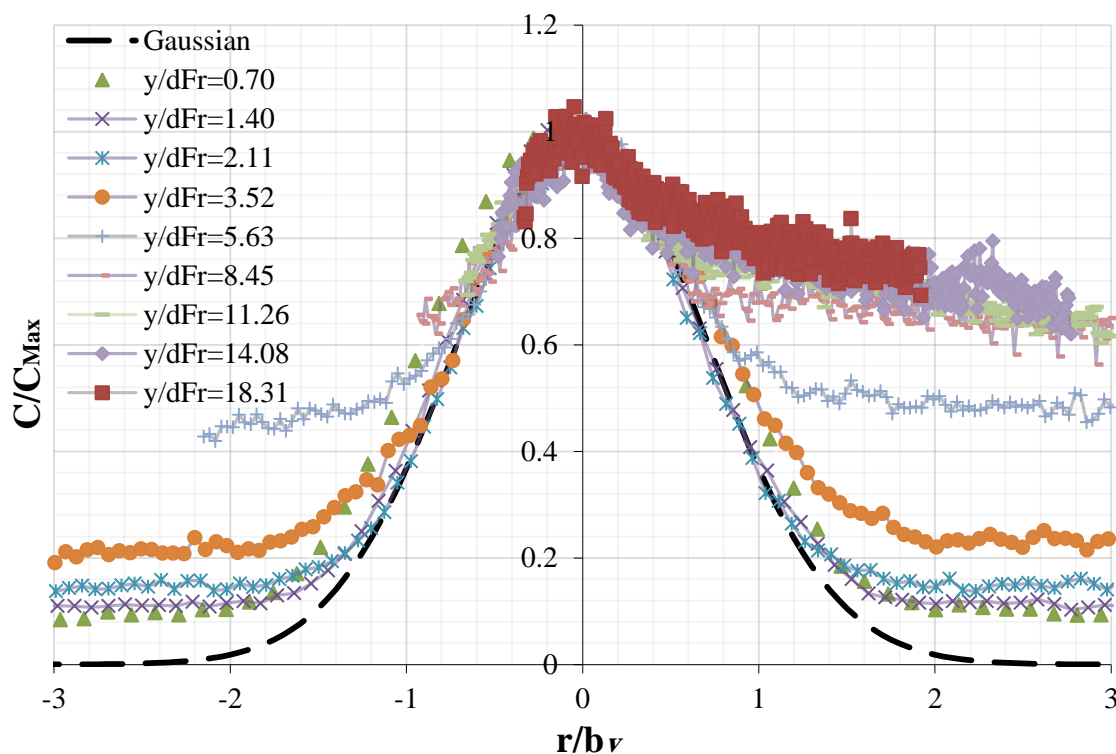
نیمرخ عرضی، با تقسیم بر بیشینه غلظت  $C_{MAX}$  روی نیمرخ، به صورت  $C/C_{MAX}$  نرمال شد. در گام بعد برای نقاط روی هر نیمرخ، یک فاصله شعاعی (فاصله طولی روی خط نسبت به مبدأ نیمرخ) به نام  $r$  تعریف شده که با تعریف پارامتر  $b_v$  به شکل  $r/b_v$  نرمال شده است.  $b_v$  فاصله شعاع روی هر نیمرخ نسبت به مرکز جریان است

در شکل زیر پروفیل‌های گوسی خود همسان<sup>۲۴</sup> جریان برای فواصل مختلف از منبع تخلیه  $(\frac{y}{d.Fr})$  در شرایطی که نسبت به مشخصات همان مقطع نرمال شده، آورده شده است. برای ترسیم این شکل، نخست نیمرخ‌های مورد نظر در نقاط مورد اشاره، عمود بر خم مرکزی جریان<sup>۲۵</sup> استخراج شد. سپس اندازه غلظت  $C$  در نقاط واقع بر هر

محور افقی برای ۹ نیمرخ مختلف در امتداد مسیر جریان<sup>۲۶</sup> ترسیم شده است. نیمرخ‌ها در نقاط مختلف و عمود بر خط مرکزی جریان<sup>۲۷</sup> استخراج شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی‌های نرمال روی هم قرار می‌گیرند که این به خوبی خود-همسانی رفتار جریان را نشان می‌دهد.

$$C(x, y) = C_{max} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{b_v^2}\right) \quad (۳)$$

که در آن، رابطه  $C/C_{MAX} = 1/e$  میان غلظت‌ها برقرار باشد. در این رابطه  $e$  عدد اویلر (ثابت نپر) و برابر با ۲٫۷۱۸ است. به این ترتیب  $b_v$  موقعیت نقطه‌ای است که غلظت جریان در آن  $\frac{1}{e}$  یا  $0.۳۷$  مقدار غلظت ماکزیمم در آن مقطع است. براساس رابطه برازش گوسی با تقسیم فاصله هر نقطه ( $r$ ) بر عرض منحنی برازش  $b_v$  مقدار کمیت  $\frac{r}{b_v}$  در محدوده  $\pm 2$  تغییر خواهد کرد. در شکل ۷، مقادیر  $C/C_{MAX}$  در محور عمودی نسبت به مقادیر  $r/b_v$  در



شکل ۷. مقایسه پروفیل‌های نرمال غلظت جریان در مقاطع مختلف از منبع جریان

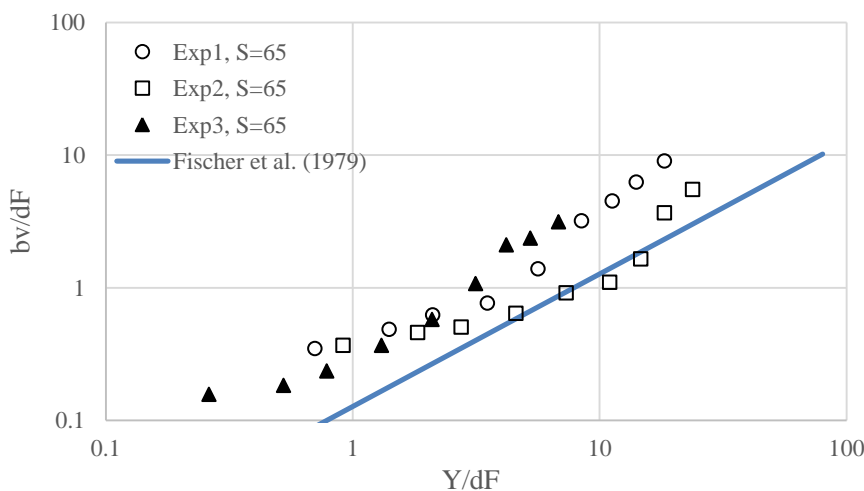
جریان برای غلظت میانگین در نیمرخ‌های متفاوت ترسیم شده است. در اشکال فوق مشاهده می‌شود به دلیل تخلیه در محیط نیمه محصور اتاق، بعد از مدتی (حدود ۵۰ ثانیه) جریان آلاینده با پرکردن محفظه و خروج از دریچه سقفی در نهایت به حالت پایداری می‌رسد. این حالت پایدار با توجه به شناوری مثبت پلوم دود در ساختمان باعث ایجاد لایه‌بندی غلظت در محفظه آزمایش می‌شود. در این لایه‌بندی از کف اتاق تا سطح به تدریج بر غلظت آلودگی

### ۲-۳. پخشیدگی جریان

پلوم جریان با ورود به محیط تحت سرعت اولیه و شناوری خود به حرکت در می‌آید. سرعت جریان و پیرو آن تنش برشی در مرزها باعث ایجاد ناپایداری کلون-هلمهولتز<sup>۲۸</sup> و کشیده شدن سیال محیط به داخل پلوم می‌شود. این موضوع اختلاط پلوم آلودگی با محیط و بزرگ شدن آن را سبب می‌شود که خود کاهش غلظت جریان و ترقیق آن را به دنبال دارد. در شکل ۷ الگوی عمومی پخشیدگی عرضی

افزوده شده و باعث ایجاد غلظت زمینه‌ای در ترازهای مختلف ساختمان می‌شود. به این ترتیب، در حرکت پروفیل‌های خود همسان غلظت، از مجاورت منبع تخلیه تا نزدیکی سقف، علاوه بر برهم خوردن تقارن جریان تحت تأثیر دیواره، به تدریج به غلظت زمینه‌ای محیط نیز افزوده می‌شود. محدود بودن پلوم از یک سمت به دیوار به تدریج سبب ویرانی تقارن نیمرخ‌ها می‌شود. نحوه بازشدگی جریان و افزایش عرض مشخصه ذاتی از جریان بوده که با تغییرات عدد فرود جریان برای آزمایش‌های مختلف تغییر چندانی نمی‌کند. در شکل ۸ نحوه بازشدگی جریان در امتداد مسیر برای سه آزمایش مختلف با مشخصات یکسان در شرایطی که نسبت به پارامترهای جریان بی بعد شده، آورده شده است. با توجه به شکل پروفیل گوسی که در آن تغییرات غلظت مجانب‌وار تا بی نهایت به صفر نزدیک می‌شود، در منابع علمی، تعاریف متفاوتی برای عرض جریان یا پخشیدگی پلوم ارائه شده است. Roberts و Abessi (۲۰۱۴) موقعیت نقطه‌ای که در آن غلظت ۱۰ درصد ماکزیمم غلظت پروفیل جریان است را با عنوان محدوده تأثیر یا عرض جریان در هر تراز معرفی کرده است. این در حالی است که Lee و Chu (۲۰۰۳) موقعیت نقطه‌ای با ۲۵ درصد غلظت ماکزیمم را عنوان عرض جریان پیشنهاد کردند. ایشان  $0.25 C_{max}$  را به عنوان موقعیت نقطه‌ای که مرز جریان در آن به صورت بصری

قابل تشخیص است، معرفی کرده‌اند. این محدوده در واقع فاصله شعاعی تا نقطه‌ای است که در آن تناوب آشفتگی برابر ۰/۵ است. Jirka (۲۰۰۴) با توجه به معادله برازش گوسی، آن‌طور که پیشتر نیز گفته شد، فاصله شعاعی نقطه‌ای روی مقطع نسبت به مرکز، که در آن غلظت  $C_{max} = 37\% \cdot C_{max} / e$  باشد را به عنوان عرض یا بازشدگی پلوم جریان در هر تراز معرفی کرده‌اند. آنچه که توسط Lee و همکاران به عنوان عرض جریان معرفی شده در واقع همتا با نقطه‌ای روی نیمرخ عرضی جریان است که عرض برابر با  $\sqrt{2}b_v$  است ( $b_v$  موقعیت نقطه  $37\% C_{max}$  درصد). در شکل ۸ نحوه تغییرات بازشدگی جریان  $b_v$  (عرض نیمرخ گوسی) به فاصله از منبع تخلیه وقتی که نسبت به عدد فرود دنسیمیتریک بی بعد شده، براساس تعریف Jirka (۲۰۰۴)، آورده شده است. مقادیر به دست آمده به طور عمومی از شبیهی که پیشتر Fischer و همکاران (۱۹۷۹) برای بازشدگی جت‌ها و پلوم‌ها پیشنهاد کردند ( $b_v = 1.67 \times Y$ ) پیروی می‌کند. در شرایط مشابه هنگامی که منبع آلودگی در خانه یا سوله کارگاهی وجود دارد، شکل زیر می‌تواند برای تعیین ناحیه‌ای از اطراف منبع که به طور مستقیم تحت تأثیر جریان خروجی قرار دارد بکار رود.

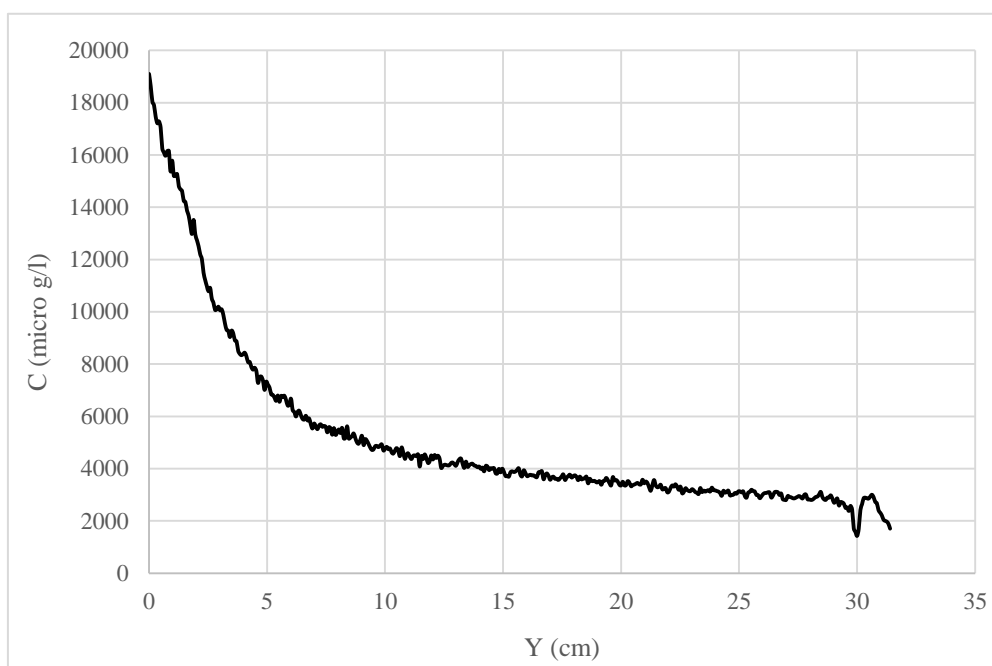


شکل ۸. نمودار تغییرات پخشیدگی عرض جریان نسبت به ارتفاع در امتداد مسیر پلوم

در ساختمان شکل می‌گیرد. شکل ۹ پروفیل تغییرات غلظت در امتداد خط مرکزی جریان را نشان می‌دهد. با ترسیم تغییرات غلظت در امتداد مسیر، در محل ورودی میزان آلودگی از بیشترین مقدار خود یعنی  $20,000 \text{ ppm}$  در مجاورت سقف در نهایت به  $2,600 \text{ ppm}$  می‌رسد. غلظت در امتداد مسیر طی دو ناحیه نخست با شیب بیشتر و سپس با شیب کمتر کاهش می‌یابد. در جت‌های شناور در ابتدای مسیر، جریان تحت تسلط اندازه حرکت<sup>۲۹</sup> جریان است. مقدار اندازه حرکت در امتداد مسیر در راستای قائم به تدریج کاهش یافته و مستهلک می‌شود. با استهلاک مومنتم و غلبه شناوری ناشی از تغییر نیروی‌های حاکم، رفتار جریان تغییر یافته و پلوم شکل می‌شود. این موضوع به طور آشکار در نقطه شکست تغییرات غلظت در امتداد خط مرکزی جریان در شکل ۹ مشاهده می‌شود. از این نقطه جریان تحت تأثیر نیروی شناوری قرار گرفته و تحت شدت متفاوتی با سیال محیط اختلاط می‌یابد. نواحی بعد از نقطه شکست ناحیه غلبه شناوری<sup>۳۰</sup> بوده که رفتار پلوم شکل جریان را نشان می‌دهد.

### ۳-۳. رقیق‌سازی آلودگی در داخل ساختمان

در این پژوهش همان‌طور که اشاره شده هدف بررسی رفتار جریان در محیط ساکن در شرایط عدم وجود باد یا هرگونه تهویه مصنوعی است. آلودگی مورد مطالعه، آلودگی از نوع گاز مونوکسید کربن است. مونوکسید کربن شاخص بیان‌کننده کیفیت هوای داخلی ساختمان است و به دلیل کم بودن جرم مولکولی و در نتیجه چگالی آن نسبت به محیط (وجود شناوری مثبت)، به سمت بالا حرکت می‌کند. افزایش دمای جریان نیز می‌تواند سبب کاهش چگالی هوا شود. گرما، عاملی تأثیرگذار در جابجایی پلوم آلودگی در محیط‌های طبیعی است. هوای گرم به دلیل انبساط مولکولی ذرات باعث کاهش چگالی گازها و حرکت آن به سمت بالا می‌شود. حرکت به سمت بالا با القای آشفتگی باعث اختلاط و رقیق‌سازی جریان می‌شود. در هندسه مورد مطالعه، پلوم شکل گرفته با رسیدن به سقف به تدریج ناشی از سبکی خود از پنجره سقفی به بیرون حرکت کرده و باعث کاهش غلظت مونوکسیدکربن در ساختمان می‌شود. تحت تأثیر شناوری جریان خروجی، اندازه ساختمان و ابعاد دریچه خروجی، جریان در نهایت بعد از مدتی به حالت ماندگار رسیده و لایه‌بندی پایداری



شکل ۹. نمودار تغییرات غلظت در راستای قائم در امتداد خط مرکزی جریان

زمان تماس با آلاینده است، در فضای تنفسی این ساختمان در وضعیت نامساعدی قرار دارد. علت این امر میزان بسیار زیاد آلودگی ورودی کربن مونوکسید (۲۰۰۰۰ ppm) و عدم تهویه مناسب ساختمان است. از این رو تهویه ساختمان با این حجم آلودگی می‌بایست به صورت مکانیکی انجام پذیرد. غلظت مونوکسید کربن به میزان ۵۰۰۰ ppm در هوا بعد از ۵ دقیقه تماس برای انسان کشنده است و این امر لزوم استفاده از سیستم‌های تهویه را در این سوله نشان می‌دهد.

این پژوهش مطالعه‌ای پیشگام در زمینه معرفی یکی دیگر از کاربردهای سیستم LIF در مطالعه آزمایشگاهی انتقال و انتشارات پلوم آلودگی در هوا است. نتایج نشان دهنده توانایی سیستم LIF برای مدل‌سازی جریان‌ات هوا در شرایط فشار و سرعت کم برای سیال در شرایط تراکم ناپذیر است. به کمک این ابزار امکان مشاهده آشفتگی و رفتار نوسانی گردابه‌ها نیز با جزئیات فراوان ممکن است که می‌تواند برای تفسیر رفتار جریان آشفته استفاده شود. در ادامه این تحقیق پیشنهاد می‌شود تأثیرات چگالی جریان خروجی و سرعت تخلیه، ابعاد بازشو و حضور جریان‌ات جانبی یا باد و نیز تهویه مصنوعی در تشدید تهویه ساختمان با توسعه مجموعه از مشاهدات آزمایشگاهی مطالعه و بررسی می‌شود. نتایج آزمایش‌های متعدد می‌تواند به ارائه مجموعه‌ای از روابط تجربی برای پیش‌بینی خصوصیات اختلاطی و تهویه طبیعی در ساختمان منتج شود. این آزمایش همچنین به عنوان یک داده مبنا (benchmark) برای کالیبراسیون مدل‌های عددی استفاده شود.

#### یادداشت‌ها

1. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers
2. dispersion
3. positively buoyant jet
4. micro-conductivity probes
5. dense Jets
6. Three Dimensional Laser Induced Fluorescent
7. analogue
8. Grashof
9. Prandtl

در آزمایش مورد بررسی، در شرایط پایدار شکل گرفته پلوم آلودگی در مجاورت سطح، جریانی از سیال آلوده پیرامون خود را بلعیده و با اختلاط دوباره با خود از میزان ترقیق آن کاسته می‌شود. این موضوع باعث کاهش تهویه طبیعی ساختمان و افزایش غلظت CO در محدوده تنفسی ساکنین خواهد شد. بررسی تأثیر انواع بازشو در ترازهای مختلف ساختمان یا تأثیر باد در تهویه بهتر ساختمان از جمله مواردی است که با توسعه آزمایش‌های مشابه با این تکنیک می‌تواند در آینده مورد مطالعه قرار گیرد.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با کمک سامانه برداشت لیزری 3D-LIF برای تعیین مقادیر تغییرات زمانی و مکانی غلظت آلودگی در محیط، به بررسی پخشیدگی جریان پلوم مونوکسید کربن (جریانی با شناوری مثبت - چگالی سبک) از یک منبع نقطه‌ای در فضای داخلی ساختمانی سوله شکل پرداخته شده است. تغییرات غلظت آلودگی در راستاهای قائم و عرضی جریان، میزان غلظت خط مرکزی پلوم و نحوه پخشیدگی جریان، ارزیابی شده است. در تخلیه جریان فوق مشاهده شده است بعد از گذشت زمانی نسبتاً طولانی (۵۰ ثانیه) یک لایه‌بندی پایدار در ساختمان تشکیل می‌شود. مشخصات لایه‌بندی متأثر از ابعاد ساختمان، دریچه خروجی و چگالی جریان است و می‌توان پیش‌بینی کرد برای جریان‌های سبک‌تر نزدیک‌تر به سقف و برای جریان‌ات نزدیک به چگالی محیط، ضخیم‌تر و نزدیک‌تر به کف ساختمان است. برای دریچه‌های سقفی بزرگتر نیز میزان ضخامت این لایه کمتر و برای دریچه‌های کوچکتر این ضخامت بیشتر خواهد بود. در نتیجه این تحقیق الگوی رفتار هندسی و اختلاطی جریان در امتداد مسیر خود در یک هندسه محدود شناسایی و کمی شد. آثار دیواره‌ها در محدود سازی پروفیل عرضی غلظت جریان و نیز اختلاط دوباره آلودگی با جریان در انتهای مسیر در مجاورت سقف مشاهده شده است.

با توجه به غلظت مونوکسید کربن در حالت پایدار مشاهده می‌گردد میزان سمیت که وابسته به غلظت و مدت

- |  |  |
|--|--|
| 10. froud Number   | 20. gray Scale                         |
| 11. plexiglass   | 21. calibration                        |
| 12. online   | 22. Gaussian                           |
| 13. Charge-Coupled Device  | 23. fit                                |
| 14. Noshirvani Institute of Technology Laser Induced Fluorescent | 24. self-similar                       |
| 15. cone shape   | 25. local centerline of the trajectory |
| 16. Rhodamine 6G, Sigma-Aldrich, St. Louis, Missouri             | 26. trajectory (Jet Centerline)        |
| 17. synchronization  | 27. local centerline of the trajectory |
| 18. filter   | 28. Kelvin-Helmholtz instability       |
| 19. schott OG 550  | 29. momentum dominated                 |
|  | 30. buoyancy dominated                 |

## منابع

عابسی، ع. رحمانی فیروزجایی، ع. حمیدی، م. بصام، م. و خدابخشی، ز. ۱۳۹۹. توسعه سامانه اسکن لیزری سه‌بعدی آشکارساز جریان فلورسنت در تحقیقات هیدرولیک محیط‌زیست، نشریه هیدرولیک. نوبت انتشار.

غیاث‌الدین، م. ۱۳۹۶. آلودگی هوا منابع، اثرات و کنترل، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

Abessi, O. and Roberts, P.J. 2014. Multiport diffusers for dense discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140: 04014032.

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. 2018. Sustainable desalination handbook, Chapter 7. Brine Disposal Management Planning Design and Implementation Guide, Elsevier Inc, Cambridge, MA 02139, United States.

Chen, Q., Lee, K., Mazumdar, S., Poussou, S., Wang, L., Wang, M. and Zhang, Z. 2010. Ventilation performance prediction for buildings: Model Assessment, *Building and Environment*, 45(2): 295-303.

Daviero, G., Roberts, P. and K., Maile. 2001. Refractive index matching in large-scale stratified experiments. *Experiments in fluids*, 31: 119-126.

Fischer, B., List, E. J., Imberger, J. and Brooks, N.H. 1979. *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press, New York.

Lee, J. H.W. and Chu, V.H. 2003. *Turbulent jets and plumes—A Lagrangian approach*, Springer, New York.

Lende, R. 1975. A temporary decrease in the ventilatory function of an urban population during an acute increase in air pollution. *Bulletin European de physiopathologie respiratoire*. 11:31-43 in WHO series No.23.

Levy, R.J. 2015. Carbon monoxide pollution and neurodevelopment: a public health concern. *Neurotoxicology and teratology*, 49: 31-40.

Livermore, S. and Woods., R.W. 2007. Natural ventilation of a building with heating at multiple levels, *Building and Environment*, 42: 1417-1430.

Limane, A., Fellouah. H. and Galanis. N. 2015. Thermo-ventilation study by OpenFOAM of the airflow in a cavity with heated floor, *Building Simulation*, 8: 271-283.

Limane, A., Fellouah, H. and Galanis, N. 2017. Simulation of airflow with heat and mass transfer in an indoor swimming pool by OpenFOAM, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109: 862-878.

Jirka, G., 2004. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: single round jet. *J. Environ. Fluid Mech.* 4: 1e56.

- Mingotti, N., Chenvidyakarn, T. and Woods, A.W. 2011. The fluid mechanics of the natural ventilation of a narrow-cavity double-skin facade, *Building and Environment*, 46: 807-823.
- Roberts, P.J. and Abessi, O. 2014. Optimization of desalination diffusers using three-dimensional laser-induced fluorescence. Agreement Number R11 AC81, 535.
- Roberts, P.J. and Toms, G. 1987. Inclined Dense Jets in Flowing Current, *Journal of Hydraulic Engineering*, 113.
- Roberts, P.J., Ferrier, A. and Daviero, G. 1997. Mixing in Inclined Dense Jets, *Journal of Hydraulic Engineering*, 123.
- Roberts, P. J., Maile. K. and Daviero, G. 2001. Mixing in Stratified Jets, *Journal of Hydraulic Engineering*, 127.
- Shao, D. and Law, A.W.K. 2010. Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets. *Environ. Fluid Mech.*, 10 (5): 521–553.
- Sykes, O.T. and Walker, E. 2016. The neurotoxicology of carbon monoxide–Historical perspective and review. *Cortex*, 74: 440-448.
- Tian, X. and Roberts, P.J. 2003. A 3D LIF system for turbulent buoyant jet flows, *Experiments in Fluids*, 35: 636-647.
- Tian, X., Roberts, P.J. and Daviero, G.J. 2006. Marine wastewater discharges from multiport diffusers. IV: stratified flowing water, *Journal of Hydraulic Engineering*, 132.
- Yu, H., Liao, C.M, Liang, H.M. and Chiang, K.C. 2007. Scale model study of airflow performance in a ceiling slot-ventilated enclosure: Non-isothermal condition, *Building and Environment*, 42: 1142-1150.