# مدلسازی عددی و آزمایشگاهی تخلیه فاضلاب شهری از تخلیه کننده تک مجرایی در محیط دریا

بهاره اصغری ۱، مهدی حمیدی ۲\*، بهرام نوایی نیا ۳، عزیر عابسی ۴

· دانشجوي كارشناسي ارشد آب و سازه هاي هيدروليكي، دانشكده مهندسي عمران ، دانشگاه صنعتي نوشيرواني بابل؛ Basghari8091@gmail.com

۲ استادیار سازههای هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران ، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛ Hamidi@nit.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد سازههای هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران ، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛ Navayi@nit.ac.ir

<sup>\*</sup> استادیار مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران ، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل؛ Oabessi@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیدہ
<i>تاریخچه مقاله:</i> تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۰۹	هدف این پژوهش بررسی رفتار جتهای با شناوری مثبت پساب شهری در پیکرههای آبی ساکن و لایه بندی نشده، با شبیه سازی آن در آزمایشگاه به کمک سامانه اسکن سه بعدی لیزری 3D-LIF و مدلسازی عددی یدیده با نرم افزار FLOW-3D می باشد. شبیهسازی آزمایشگاهی، برای سه جت تخلیه با اعداد فرود ۱۰، ۱۵ و
<i>کلمات کلیدی:</i> شبیهسازی عددی	۲۰ انجام گرفت و با نتایج مدل عددی و نتایج عددی قبلی مقایسه گردید. مسیر حرکت جت، تغییرات غلظت، موقعیت و میزان ترقیق نقطه برخورد نیز تعیین گردید. در مدل عددی از دو مدل آشفتگی ٤-K و RNG به
شناوری مثبت 3D-LIF FLOW-3D	منظور ارزیابی صحت مدل عددی در شبیهسازی استفاده شد، که نتایج مدل K-E به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر بوده و قادر به مدلسازی دقیقتر مسیر حرکت جت نسبت به مدل RNG میباشد. در بررسی با اعداد فرود
	متفاوت، نتایج در Fr=20 برای همه حالات تجربی و عددی تقریبا یکسان و نشان دهنده افزایش دقت نتایج در مدل عددی با افزایش دبی و عدد فرود و تطابق بهتر با مدل تجربی می باشد.

## Numerical and Laboratory Modeling of Urban Sewage Discharge from Single port outfalls into Marine Environment

Bahare Asghari<sup>1</sup>, Mehdi Hamidi<sup>2\*</sup>, Bahram Navayi Neya<sup>3</sup>, Ozeair Abessi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> M.Sc.student, Babol Noshirvani University of Technology; basghari8091@gmail.com

<sup>2</sup> Assistant Prof, Babol Noshirvani University of Technology; Hamidi@nit.ac.ir

<sup>3</sup> Professor,, Babol Noshirvani University of Technology; Navayi@nit.ac.ir

<sup>4</sup> Assistant Prof, Babol Noshirvani University of Technology; Oabessi@nit.ac.ir

## ARTICLE INFO

Article History: Received: 11 Jan. 2020 Accepted: 29 Jun. 2020

*Keywords:* Numerical Simulation positive buoyancy 3D-LIF FLOW-3D

## ABSTRACT

The purpose of this paper is to investigate the behavior of positive buoyancy jets of urban wastewater in stationary and non-stratified water bodies using the investigation of the laboratory data acquired by a 3D-LIF laser 3D scanning system and numerical modeling results from the simulation by FLOW-3D software. Laboratory simulation was performed for three discharge jets with Froude numbers 10, 15, and 20, and compared with the results of the numerical model and the previous numerical results. The trajectory of the jet, concentration variations, the position of the impact point, and the rate of dilution at the impact point was determined. In the numerical model, both K- $\epsilon$  and RNG turbulence models were used to evaluate the accuracy of the numerical simulation where the K- $\epsilon$  results were closer to laboratory results and are capable of accurately modeling the jet trajectory than the RNG model. By different Froud numbers, the results at Fr = 20 are almost the same for all experimental and numerical states and indicating that by increasing the discharge and Froud number, the accuracy of the results in the numerical model increases and present closer results to the experimental model.

#### ۱ – مقدمه

تخلیه مســتقیم فاضـلاب در دریا از روشهای معمول در دفع پسابهای تولیدی در مناطق ساحلی محسوب می گردد. بسیاری از محققان بر این باورند که تصفیه ثانویه فاضلاب، به هزینه و انرژی بالایی نیاز دارد و تولید و دفع لجن باید به طور مداوم تحت کنترل باشد، در صورتی که با طراحی صحیح و مناسب سیستم تخلیه فاضلاب به دریا، می توان حجم زیادی از فاضلاب را بدون نیاز به تصفیه ثانویه در محیطهای با توانایی خود پالایی بالا همانند دریاهای آزاد دفع نمود. امروزه تخلیه فاضـلابها در دریا به سـه صورت انجام می گیرد که عبارتند از: تخلیه مستقیم در ساحل، تخلیه با استفاده از تخلیه کننده های دریایی کوتاه با احتمال آلوده کردن آبهای ساحلی و تخلیه با استفاده از تخلیه کنندههای مستغرق که فاضلاب را به مقدار کافی ترقیق و در فاصله مناسب از ساحل پخش می کنند[۱]. تخلیه کنندههای مستغرق نوع پر کاربردی از تخلیهکنندههای دریایی هستند که خود شامل دو گروه تخلیه کننده های تک مجرایی و پخش کننده های چندمجرایی مىباشند. روش تخليه به خصوصيات هيدروليكي سازه تخليهكننده، شرایط محیط پذیرنده و نوع فاضلاب خروجی بستگی دارد. فاضلابهای خروجی تحت تاثیر سه مرحله، در پیکرههای آبی پذیرنده انتقال یافته و پخش می گردند. مرحله اول، فاز اختلاط اولیه است که طی آن، شارهای جریان خروجی از تخلیه کننده تعیین کننده رفتار جریان میباشند. در انتهای ناحیه اختلاط اولیه، آشفتگی ایجاد شده توسط مومنتوم اولیه جریان بهتدریج از بین رفته و آشفتگی ناشی از خصوصیات پیکره آبی پذیرنده بر آن غلبه مییلبد[۲–۳]. فاز دوم، ناحیه اختلاط میدان دور<sup>۲</sup> میباشـــد که در آن اختلاط توسط فرآیندهای انتقال و آشفتگی حاکم بر محیط پذیرنده کنترل می گردد. فاز سوم و انتهایی اختلاط تحت عنوان محدوده دراز مدت پخش جریان<sup>۳</sup>محدودهای است که طی آن فاضلاب خروجي، توسط نقل و انتقالات بزرگ مقياس محيط یخش می گردد. فاضلابهای خروجی ممکن است چگالی بیشتر، برابر یا کمتر از پیکره آبی پذیرنده داشته باشند. به این فاضلابها به ترتیب فاضلابهایی با شناوری منفی، خنثی و مثبت اطلاق می شـود. در تخلیه فاضـلابها با شـناوری مثبت، به دلیل تخلیه فاضلاب در مجاورت بستر و حرکت آن به سمت سطح ناشی از سـبکی نسـبی جریان، فاضـلاب در نهایت در تماس با اتمسـفر قرار گرفته و روی سطح پخش می شود [۴].

شارپ(۱۹۷۵) و شارپ و ویاس(۱۹۷۷)، از پیشگامانی بودند که رفتار پسابهای حرارتی مستغرق تحت عنوان جتهای شناور را مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آنها برروی رفتار جتهای شناوری که بلافاصله بالای سطح افقی تخلیه میشود تمرکز داشت و مشاهده شد که جریان در این حالت در قسمت اولیه مسیر خود به

عنوان یک جت دیواری رفتار می کند [۵-۶]. لین و همکاران(۱۹۷۷)، جتهای سطحی شناور تخلیه شده به صورت عمود بر جریان محیط را از منظر توزیع دما، در مقاطع عرضی مختلف، مسیر حرکت و پخشیدگی عرضی و عمقی جریان مورد مطالعه قرار دادند. این محققین حداکثر ضخامت جریان را وابسته به عدد فرود دنسیمتریک و به مقدار ۰.۵Fr مشاهده نمودند [۷]. عبدالواحد (۱۹۸۱)، جتهای سطی غیر شناور را در محیطهای پذیرندهی کم عمق و عمیق مورد مطالعه قرار داد و با بررسی مسیر حرکت، ضخامت و عرض جریان در مقاطع مشخص را بررسی کردند [۸]. رابرتز و همکاران (۱۹۹۷)، برای انجام تحقیقات آزمایشـگاهی بر تخلیهکنندههای تک مجرایی، از یک فلوم آزمایشـگاهی به طول ۶/۱ متر، عرض ۹۱ سـانتیمتر و عمق ۶۱ سانتیمتر استفاده کردند و با بهره گیری از ترکیب روشهای LIF و ریز کاوشــگر هـدایـت شــونـده، معادلات پیشبینی کننده خصوصیات جریان جتهای سینگین در محیط ساکن را به کمک روش مقیاس طولی و آنالیز ابعادی تعیین نمودند. این محققین با انجام آزمایشهای خود، معادلات پیشبینی کننده میزان اختلاط، ارتفاع خیزش و ضخامت جریان در تخلیه جتهای سینگین از تخلیه کننده های تک مجرایی را برای اولین بار تعیین و ارلئه نمودند و بر این باور بودند که اختلاط موثر در تخلیه یک جت سنگین، با ایجاد سرعت بالا هنگام تخلیه و افزایش آشفتگی در جت بهوجود می آید [۹]. موواد (۱۹۹۸)، با بررسی جتهای سطحی غیر شناور، پروفیلهای غلظت و سرعت، خصوصیات اختلاط و نرخ ترقیق را در این جتها مورد مطالعه قرار داد. این محقق عرض و ضخامت جتهای سطحی را بررسی نمود و نسبت عرض جریان به ضخامت آن را در محدودهی ۱/۲ تا ۳/۶ مورد ارزیابی قرار داد [۱۰]. ژیر کا (۲۰۰۷)، در مطالعات خود دریافت که در محیطهای ساکن، جریان به دلیل سبکی سیال تماس خود را با سطح حفظ نموده و پس از طی یک ناحیه یجت مانند، تاثیر پخشیدگی ناشی از شناوری در مجاورت سطح گسترش خواهد یافت. همچنین الگوی عمومی حرکت جتهای شناور سطحی در محیطهای ساکن را ارائه نمود[11]. کیم و همکاران (۲۰۰۲)، فرآیندهای اختلاط یک جت شــناور مســتغرق را که با اســتفاده از یک مدل ترکیبی ســه بعدی تخلیه شده بود، بررسی کردند. در مدل ترکیبی ارائه شده، اختلاط اولیه با روش جت انتگرالی و فرایند انتقال-انتشار با استفاده از یک روش ردیابی ذرات، شـبیهسازی گردید. مدل پیشـنهادی آنها در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تأیید و برای شرایط مختلف اعمال شد. این محققین نتیجه گرفتند که توزیع غلظت افقی و حداقل میزان ترقیق در سطح آب در این مدل شبیهسازی شده، به طور کلی مطابق با دادههای تجربی جمع آوری شده بوده است [۱۲]. مائل و مرسی (۲۰۰۶)، از مدلهای آشفتگی k-٤ استاندارد و realizable k-E استفاده نمودند و دقت این مدلها در انواع مختلفی از

ستونهای شناور را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که مدل realizable k-ε دارد[۱۳]. کیم و چو (۲۰۰۶)، تخلیه پساب سبک گرمایشی به شکل سطحی و مستغرق در آبهای کم عمق و عمیق و در حضور شکل سطحی و مستغرق در آبهای کم عمق و عمیق و در حضور جریانهای محیطی را در نرم افزار FLOW-3D و با استفاده از مدلهای آشفتگی RNG و عدیرسی قرار دادند[۱۴]. پاپانیکولا و میچاس(۲۰۰۹)، جتهای آشفته تخلیه شده در یک محیط آرام همگن را مورد آزمایش قرار دادند. این پژوهشگران ویژگیهای اختلاط مانند مسیرها، خصوصیات آشفتگی و عوامل تخلیه جت دایرهای به صورت افقی با ذرات رسوب انجام گرفت. آنها مقایسه فاز مایعات به کمک شبیه سازی مدل آشفتگی ادیهای بزرگ<sup>†</sup> انجام دادند، در حالی که برای محاسبه حرکت ذرات رسوب، از ردیابی ذرات لاگرانژی استفاده گردید[۱۶].

بررسی پژوهشهای ذکر شده نشان می دهد، مطالعات موجود در مورد جتهای آشفته عمدتاً بر رفتار هندسی جریان متمرکز شده است، در حالی که ویژگیهای اختلاط بهندرت مورد بررسی قرار گرفتند. از طرف دیگر با وجود این که در حال حاضر جتهای با شناوری مثبت کاربرد زیادی در سراسر جهان برای تخلیه فاضلابها دارند، اما تحقیقات اندکی در مورد شبیهسازی عددی آنها انجام گرفته است. از این رو نیاز به تحقیقات بیشتر در ارتباط با مدل سازی عددی جتهای با شناوری مثبت با استفاده از مدلهای تجاری و تحقیقاتی که در سالهای اخیر توسعه داده شدهاند به طور آشکار احساس می گردد. از طرف دیگر، از آنجاکه هدف از طراحی و ساخت تخلیه کنندهها، ارضای استلنداردهای کیفیت آب از راه افزایش اختلاط اوليه و سرعت بخشيدن به فرآيند انتقال و پخش فاضلاب در محیط دریا با کنترل پارامترهای جریان میباشد، با شیناخت تخليه كنندهها و طراحي مناسب أنها و مديويت مقدار فاضلاب تخلیه شده، می توان میزان اختلاط، مس یر جریان و شکل پلوم آلودگی را کنترل کرد. به این ترتیب با ترقیق مناسب آلایندهها به میزان قابل تحمل محیط پذیرنده، از اثرات نامطلوب زیست محیطی آن کاسته می شود و تخلیه پیوسته پسابها در محیط پذیرنده امکان پذیر میباشد. تمرکز این پژوهش بر بررسی خصوصیات اختلاطی جریان در تخلیه فاضلابهای با شناوری مثبت در محیطهای سےاکن در محدودہ میدان نزدیک اسےت که به کمک مدلسازی عددی و آزمایشگاهی انجام گرفته است. در بخش عددی عملکرد دو مدل مهم آشفتگی ( RNG و RNG) در حل معادلات میانگین ناویر-اســتوکس<sup>۵</sup> مورد بررســی و مطالعه قرار گرفت و از میان مدل های فوق بهترین مدل با مقایسه نتایج شبیه سازی با دادههای آزمایشگاهی انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت[۱۷].

بخش آزمایشگاهی نیز به صورت تخلیه جت سبک با عدد فرودهای دنسیمتریک متفاوت در مخزن آب ساکن و بهرهبرداری و ثبت نتایج توسط سامانه 3D-LIF که مجهز به ابزار اندازه گیری غلظت در زمان برای بررسی دقیق فرایند اختلاط می باشد، انجام گرفت. بدین منظور، مسیر حرکت جت برای اعداد فرود مختلف، غلظت در امتداد جت و میزان ترقیق در امتداد مسیر و محل نقطه برخورد جت با سطح، استخراج و با دادههای پیشین مقایسه گردید.

#### ۲ - معادلات حاکم

معادلات حاکم بر فیزیک پدیده، معادلات ناویر-استوکس هستند که برای حالت سه بعدی و سیال غیر قابل تراکم ارائه می شوند. معادله پیوستگی بهصورت معادله (۱) بیان میشود

$$\begin{split} V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} &+ \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_Z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = \\ R_{DIF} + R_{SOR} \end{split}$$
(1)

که در آن  $V_F$  ضریب حجم آزاد به سمت جریان،  $\rho$  دانسیته سیال و اجزاء سرعت (u,v,w) در جهات کارتزین (x,y,z) یا استولنهای (r, $\Theta$ ,z) هستند. در مختصات کارتزین، R برابر ۱ و  $\xi$  برابر صفر است. در مختصات استوانه ای  $\xi$  برابر ۱ است. عبارت RDIF در طرف راست معادله پیوستگی جرم برابر با عبارت پخش آشفتگی است و به صورت معادله (۲) تعریف می گردد:

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_{\rho} A_{x} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( v_{\rho} A_{y} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_{\rho} A_{z} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho v_{\rho} A_{x}}{x}$$
(Y)

و عبارت R<sub>SOR</sub> منبع جرم است که با استفاده از معادله (۳) بیان می گردد:  $\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho}$ (۳) (u,v,w) معادلات حرکت (مومنتوم) برای مولفه های سرعت سیال (u,v,w) و (۶) تعریف در مختصات سه بعدی نیز به صورت معادلات (۴)، (۵) و (۶) تعریف

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \zeta \frac{A_y V^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s)$$
(\*)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \zeta \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial P}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} \left( v - v_w - \delta v_s \right)$$
( $\delta$ )

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s)$$
 (8)

$$L_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/4}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} . dFr \tag{(1.)}$$

عدد فرود دنسیمتریک نیز با استفاده از معادلات (۹) و (۱۰) محاسبه

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g'.D}} \tag{11}$$

$$g' = g \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} \tag{11}$$

که در این معادلات U سرعت اولیه جت، 'g شتاب گرانش اصلاح  $ho_0$  شده، D قطر مقطع جت، g شتاب گرانش،  $ho_a$  چگالی محیط و  $ho_a$ 

## ۳ – مواد و روشها ۳-۱-مدل آزمایشگاهی

در این پژوهش، از سامانه اسکن سه بعدی لیزری (3D-LIF) توسعه داده شده در آزمایشگاه هیدرولیک-محیط زیست دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل جهت مطالعه رفتار جریان در آزمایشگاه استفاده شده است [۲۰]. این سامانه در زمینه آشکارسازی رفتار پدیدههای هیدرولیکی مربوط به سیال متلاطم در محیط زیست مورد استفاده قرار می گیرد و شامل تانک آب شیشهای، پمپها و اتصالات لازم، نازل افقى، سيستم تزريق، منبع تابش ليزر يون- آرگون، دوربين سریع و سامانه ثبت و پردازش دادهها میباشد که در داخل یک اتاق کاملا تاریک تعبیه شده است. در شکل ۱ نمایی کلی از تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش و در شکل ۲ نمای شماتیک این سامانه آورده شده است. این سامانه با تاباندن نور لیزر به جتی از پساب مصنوعی حاوی فلورسنت، اقدام به آشکارسازی رفتار جریان و در نهایت ثبت تصاویر مینماید. تمام آزمایشات این پژوهش در یک مخزن شیشهای شفاف مستطیل شکل با طول ۱.۶۵، عرض ۸۵. ۲ و عمق ۰.۹۵ متر انجام گردید. کف و دیوارههای فلوم از شیشه دو لایه با ضخامت دو سانتیمتر ساخته شد و در تراز یک متری از سطح زمین جانمایی گردید. منبع پرتو لیزر استفاده شده با نور سبز رنگ و با طول موج ۵۱۴ نانومتر در سمت چپ تانک قرار گرفته است و امکان دسترسی صفحات لیزر به داخل آن را فراهم مىكند. اين منبع توليد ليزر به منظور كنترل فرآيندهاى آزمايش، همراه با یک سیستم کنترلی و دوربین دیجیتال به یک پردازشگر مرکزی متصل شده است. این پرتو می تواند با حرکت به سمت بالا و طرفین صفحات لیزری ایجاد کرده و در فعالیت همزمان با دوربین، اسکن سه بعدیای از حجم کنترل سیال درون تانک را میسر نماید. برای همه آزمایشها از آب شهری به عنوان سیال محیط پذیرنده (آب مخزن) استفاده گردید. نازل تخلیه، جت مدوری با قطر داخلی  $f_z$ ,  $f_y$ ,  $f_x$  معادلات بالا  $G_z$ ,  $G_y$ ,  $G_x$  شتاب حجمی، پارامترهای  $f_x$ ,  $f_x$  معادلات بالا شتابهای ناشی از لزجت، و  $b_y$ ,  $b_x$  و  $z^b$  افت جریان در محیطهای داراای خلل و فرج و عبارت آخر سمت راست مربوط به تزریق جرم در سرعت صفر است. معادله انتقال غلظت نیز در کنار معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس حل می شود. این معادله به صورت رابطه شماره (۷) و (۸) قابل ارائه می باشد:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D_{eff} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x} + \frac{\partial^2 C}{\partial y} + \frac{\partial^2 C}{\partial z} \right)$$
(Y)

$$D_{eff} = \frac{\nu_t}{Sc_t} + \frac{\nu}{Sc} \tag{(A)}$$

در رابطه فوق C غلظت بر حسب مول بر متر مکعب است که (قابل تبدیل به شوری بر حسب گرم بر لیتر ) نیز میباشد. همچنین ترم-های  $Sc vt vt vr D_{eff}$  به ترتیب نرخ پخشیدگی موثر (با بعدی برابر با بعد لزجت سینماتیک و با واحد متر مربع بر ثانیه)، لزجت سینماتیک مولکولی سیال، لزجت آشفته جریان، عدد بیبعد اشمیت مولکولی سیال و عدد بیبعد اشمیت آشفته جریان هستند.

#### ۲-۱-آنالیز ابعادی

جریان جت آشفته تخلیه شده از نازلی با قطر b و زاویه  $\Theta$  نسبت به افق از نظر ابعادی توسط فیشر و همکاران(۲۰۱۳)، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است[۱۸]. در این جریان اگر سرعت اولیه u و چگالی آن aو چگالی محیط پذیرنده a در نظر گرفته شود، جریان را میتوان با استفاده از زاویه تخلیه  $\Theta$ ، شار حجمی Q، شار مومنتوم M و شار شناوری B به عنوان پارامترهای اصلی تاثیرگذار مورد بررسی قرار داد. کمیتهای ذکر شده، پارامترهای مستقل هستند و

## (٩)

با کمک تحلیلهای ابعادی و ترکیب شارهای شناوری و مومنتوم کمیت  $L_M$  با بعد طول با استفاده از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است.  $L_M$  بیانگر فاصله ای است که در آن انتقال از ناحیه غلبه مومنتم (رفتار جت مانند) به ناحیه غلبه شناوری (رفتار پلوم شکل) اتفاق می افتد. در فاصله  $L_M >> x$  رفتار جریان توسط مومنتوم جریان خروجی کنترل میشود و در محدوده  $L_M << x$  شناوری سیال است که تعیین کننده رفتار جریان می باشد. مقیاس طولی  $L_M$ است که تعیین کننده رفتار جریان می باشد. مقیاس طولی جریان دربردارنده کمیتهای اصلی لازم در تحلیل و بی بعدسازی جریان های آشفته است.  $L_M$  در واقع برابر با عدد فرود دنسیمتریک dFrمی باشد که در تحلیلهای ابعادی برای بی بعدسازی کمیتهای با بعد مول مورد استفاده قرار می گیرد.

 $\varphi = f(Q, M, B, \theta)$ 

۵ میلی متر است که به صورت افقی در فاصله ۱۰ سانتی متری زیر سطح قرار داده شده است و پساب با غلظت ۳۵ میلی گرم بر لیتر نمک NaCl و غلظت فلورسنت ۳۰۰ میکروگرم بر لیتر با سه دبی ۲۵، ۵۰۸ و ۵۰ لیتر بر ساعت از نازل به داخل مخزن تخلیه گردید. برای شبیه سازی جت با شناوری مثبت در مخزن با قرار دادن نازل در مجاورت سطح و ورود پساب، بدون نیاز به بالابردن چگالی آب محیط یا کاهش چگالی پساب ورودی فرایند تخلیه فاضلاب سبک به صورت معکوس شبیه سازی گردید[۱۹].







#### ۲-۳-مدل عددی

در این پژوهش از نرمافزار Flow-3D برای مدلسازی عددی جت خروجی جریان با شناوری مثبت استفاده شد. این نرمافزار از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم بر جریان و روش حجم سیال برای محاسبه سطح آزاد آب در مجاری باز استفاده می کند و قابلیت تحلیل یک، دو و سهبعدی جریان را دارد. علت استفاده از این نرمافزار، کاربرد بسیار بالای آن در دینامیک سیالات محاسباتی می باشد [۲۱]. در این نرمافزار از حل معادلات پیوستگی و ناویر استوکس برای پیش بینی مشخصات جریان استفاده شده است. شبکه حل در مدل Flow-3D متشکل از سلولهای مکعب مستطیلی است و معادلات دیفرانسیلی که در این مدل باید مورد حل قرار بگیرند، می توانند در

RNG از پنج روش برای حل آشفتگی جریان استفاده میکند که عبارتند از: روش برای حل آشفتگی جریان استفاده میکند که عبارتند از: روش طول اختلاط پرانتل، روش یک معادلهای انرژی جنبشی آشفتگی، روش مدل دو معادلهای ٤-K، روش مدل گروههای نرمال شده (RNG) و مدل شبیهسازی گردابههای بزرگ (LES). در این مطالعه از مدل دو معادلهای ٤-K و مدل RNG برای بررسی شبیهسازی جریانهای متلاطم استفاده گردید[۲۲].

## ۳-۳- شرایط مرزی و مدل آشفتگی

شرایط مرزی کف و دیوارههای جانبی مخزن، دیوار (wall) در نظر گرفته شد. این شرایط مرزی دقیقا مشابه یک دیوار عمل می کند و میتواند بر اساس لغزش یا عدم لغزش جریان روی دیواره مولفههای سرعت روی دیواره را معرفی کند. برای سطح آزاد مخزن شرایط متقارن (symmetry) منظور شد که این شرط مرزی در سطح آزاد طوری عمل می کند که تا وقتی جریان سیال به این مرز نرسد، شرایط بالای سطح سیال تا بینهایت مشابه شرایط اتمسفر در نظر گرفته می شود اما در صورتی که سیال به این مرز برسد، شرایط بیرون شبکه حل را نیز اشباع از سیال خواهد یافت و جریان به صورت تحت فشار عمل خواهد کرد. شکل ۳ نمای شماتیکی از شرایط مرزی و مش بندی مدل عددی را نشان می دهد.

شرایط اولیه برای دبی پساب ورودی به مخزن حللت نرخ دبی حجمی<sup>۶</sup> انتخاب گردید که برای تعریف دبی ورودی از یک مرز در ارتفاع و جهت دلخواه استفاده می شود. برای مقایسه اثر مدل آشفتگی و دقت نتایج برای شرایط مشابه از دو مدل آشفتگی RNG و ع-K برای شبیه سازی جریان استفاده گردید. اگرچه نتایج حاصله از این دو مدل آشفتگی تا حد زیادی مشابه هم می باشد ولی با از این دو مدل آشفتگی تا حد زیادی مشابه هم می باشد ولی با اختلاف کمی مدل ع - ۲ نسبت به مدل RNG برای هر سه دبی، نتایج نزدیک تری را به نتایج آزمایشگاهی ارائه داد. مدل جریان برای حالت غیر ماند گار و برای زمان ۸۰ ثانیه ران شده و نتایج آن استخراج گردید. این زمان بعد از انجام شبیه سازیها و مقایسه زمانهای موردنیاز برای رسیدن به پایداری حل و همگرایی جوابهای





شکل ۳- نمای شماتیک (الف): شرایط مرزی، (ب): مش بندی

## ۳-۴- معرفی مدل هندسی

در این پژوهش مدل هندسی در نرم افزار 3D-Flow به صورت یک مخزن روباز با طول ۱ متر، عرض ۲۰۹ متر و ارتفاع ۲۰۹ متر با مش بندی منظم در شبکه حل به تعداد ۴۰۰۰۰ سلول طراحی شد. داخل مخزن نیز سیال آب با چگالی ۱۰۲۴ کیلوگرم بر متر مکعب و غلظت ۳۵ گرم در هر لیتر مشابه شرایط آب در دریاهای آزاد تا ارتفاع ۸.۰ متر فرض شد. پساب خروجی سبک و با چگالی ۹۹۸ کیلوگرم بر متر مکعب و غلظت ۱ گرم در هر لیتر فرض شده و به صورت نازلی دایرهای با قطر ۹ میلیمتر در فاصله ۱.۰ متری از ابتدا مخزن که در وسط عرض تانک در ارتفاع ۲۰۰۰ متر از کف تعبیه شده است. در مدل سازی عددی جریان، رفتار تخلیه برای دو مدل آشفتگی RNG و K-۳ هر یک به ازای سه دبی ۳۹.۰۲، ۵۸.۵۲ و ۲۸.۰۲ سانتیمتر مکعب بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۳-۵- نتایج و بحث

هنگامی که یک جت افقی با شناوری مثبت وارد مخزن می گردد، محیط ورودی خود را تحت تاثیر قرار داده و سبب تغییر رفتار پیرامون خود می شود. سپس با طی مسافت کوتاهی از دهانه نازل، نیروی شناوری بر جت غلبه کرده و جت را وادار به حرکت به سمت سطح می کند. آزمایشات انجام شده در این پژوهش که برای سه عدد فرود ۱۰ ، ۱۵و ۲۰ انجام گرفته با نتایج شبیه سازی عددی مدل های آشفتگی K-E و RNG با فرودهای مشابه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. الگوی حرکت جریان در محیط، پارامتری تعیین کننده در

طراحی تخلیه کننده های دریایی محسوب می گردد. با توجه به نتایج مدل سازی های عددی و شبیه سازی های آزمایشگاهی مشاهده می-شود هرچه شار مومنتم جریان خروجی (Fr) بزرگتر شود، زمان و طولی که جت برای رسیدن به سطح آب طی می کند افزایش می یابد. ترقیق نهایی در انتهای میدان نزدیک نیز تابعی از مسیر جت و خصوصیات محیط (بعنوان مثال عمق آب برای جت های شناور) است.

در شکل ۴ مسیر حرکت فاضلاب سبک خروجی از تخلیه کننده در محيط ساكن براى عدد فرودهاى دنسيمتريك متفاوت جريان خروجی به ترتیب برای مدل آزمایشگاهی و ۲ مدل عددی فوق آورده شده است. هنگامی که یک جت شناور افقی در مخزن آب ساکن تخلیه می شود، سیال درون مخزن در ناحیه ورودی جت روی آن تأثیر می گذارد و باعث تغییر در رفتار جت می شود. در فاصله کمی از خروجی نازل، جریان جت تحت تأثیر نیروی مومنتوم قرار می گیرد. یس از طی فاصله مشخصی از دهانه نازل، با اضمحلال نیروی مومنتوم جت، نیروی شناوری غالب شده و بر جت تسلط می ابد و آن را وادار می کند تا به سمت سطح آب حرکت کند. مسیر جت پارامتر بسیار مهمی در طراحی سیستمهای تخلیه است زیرا مسیری را که از طریق جت طی می شود و از آنجا به سطح آب می رسد، مشخص می کند. ترقیق نهایی در انتهای میدان نزدیک نیز تابعی از مسیر جت و خصوصیات آب محیط (به عنوان مثال عمق آب به ویژه برای جتهای مثبت شناور) است. با توجه به تصاویر ارائه شده در شکل ۴ مشاهده می شود که جت در راستای طول (x)، در Fr=10 حدود ۳۰ سانتی-متر، در Fr=15 بین ۳۵ تا ۴۰ سانتیمتر و در Fr=20 نزدیک به ۴۵ سانتیمتر مسافت را برای رسیدن به سطح آب طی میکند. بررسی مقایسهای این تصاویر، نحوه تغییر مشخصات حرکت ناشی از تغییر شارهای اولیه جریان خروجی را نشان میدهد. همچنین از این تصاویر میتوان دریافت شبیهسازی مسیر حرکت جت در مدل عددی، با تقریب بسیار خوبی مشابه نتایج مدل آزمایشگاهی است. همان طور که در تصاویر ارئه شده در شکل ۴ مشاهده می شود با افزایش سرعت تخلیه، جت ایجاد شده به واسطه مومنتوم اولیه خود مسیر طولانی تری را برای رسیدن به مجاورت سطح آب طی می کند.



شکل ۴– مسیر حرکت جت، در مدل آزمایشگاهی (الف): Fr=10، (ب): Fr=15 و (پ): Fr=20 و در مدل آشفتگی k-٤ (ت): Fr=10 ، (ث): Fr=15 شکل ۴– مسیر حرکت جت، در مدل آزمایشگاهی (الف): Fr=10، (ج): Fr=20 و در مدل آشفتگی RNG (چ): Fr=15، (خ): Fr=20 (خ): Fr=20



شکل ۵- مقایسه خط مرکزی مسیر حرکت برای مدل آزمایشگاهی شکل ۵ مقایسه خط مرکزی مسیر حرکت برای اعداد فرود مختلف در مدل آزمایشگاهی را نشان میدهد. نمودارهای ارائه شده در این شکل نمودارهای بیبعد شده مسیر حرکت جت نسبت به قطر نازل خروجی و عدد فرود دنسیمتریک برای نتایج مدل آزمایشگاهی در

سه عدد فرود ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میباشند که نشان میدهد جت با افزایش سرعت اولیه و عدد فرود دنسیمتریک به مقدار بیشتری از نازل منحرف میشود. از این نتایج میتوان دریافت وقتی جت در فاصله طولانیتری درون آب محیط قرار میگیرد، زمان رسیدن به سطح و رقیق شدن افزایش مییابد. با افزایش عدد فرود، دبی متناظر با آنها نیز افزایش مییابد که نشان میدهد که در شرایط یکسان، جریان خروجی با دبی بیشتر، مسیر طولانی تری را برای رسیدن به سطح طی میکند.

Downloaded from marine-eng.ir on 2025-06-02



شکل ۶- مقایسه نمودار غلظت در راستای خط مرکزی مسیر حرکت برای مدل آزمایشگاهی

شکل ۶ نمودار غلظت در راستای خط مرکزی مسیر بر حسب عدد فرودهای دنسیمتریک مختلف را در مدلسازی آزمایشگاهی نشان میدهد. در تخلیه فاضلابهای سبک، جریان خروجی از جت تخلیه به محض ورود به محیط، تحت تاثیر تنشهای برشی شکل گرفته، به وسیله ایجاد آشفتگی، سیال محیط را به درون خود می کشد. ورود سیال محیطی به داخل مسیر جت از مرزهای جریان سبب تغییرات غلظت و کاهش آن در امتداد خط مرکزی جریان می گردد. میزان غلظت در محل ورود فاضلاب به مخزن دارای بیشترین مقدار خود معادل ۳۰۰ میلی گرم بر لیتر می باشد. تغییرات غلظت در راستای مسیر حرکت نشان میدهد که فاضلاب در لحظه تخلیه بر محيط پيرامون خود غلبه داشته و بعد از طي مسافتي تحت تاثير شرایط محیط پذیرنده خود قرار گرفته و به تدریج غلظت آن کاهش یافته و در نهایت به غلظت محیطی که در آن تخلیه شده است، می رسد. فاصله ای که پساب خروجی بر محیط پذیرنده غلبه دارد و طی آن غلظت پساب در خط مرکزی جریان تغییر نمی کند محدوده شکل گیری جریان در محیط محسوب می شود. در طول این ناحیه که محدود به چند سانتیمتر یا میلیمتر ابتدای جریان است اثرات آشفتگی ایجاد شده در اطراف جت بر روی آن تاثیری ندارند، اما بهتدریج اثر ناپایداری در مرزها به مرکز جریان رسیده و باعث کاهش غلظت آن می شود.

در تخلیه کننده های فاضلاب های سبک، پیش بینی غلظت و موقعیت نقطه برخورد جت با سطح آب به عنوان اولین نقطه تماس فاضلاب با سطح، برای دستیابی به حداکثر ترقیق در این نقطه از اهداف اصلی در طراحی تخلیه کننده های دریایی می باشد.





شکل ۷ مقایسه میزان ترقیق در نقطه برخورد مدل آزمایشگاهی با میزان ترقیق در همان نقطه در مطالعات رابرتز و لیست را نشان میدهد. با توجه به این شکل مشاهده میشود موقعیت نقطه برخورد جریان با سطح در تخلیه جت سبک مقداری متغیر بوده که با تغییر دبی و به تبع آن تغییر عدد فرود موقعیت جت خروجی تغییر می-یابد. با توجه به این نمودار میتوان نتیجه گرفت با افزایش سرعت تخلیه و عدد فرود پساب خروجی، فاضلاب مسیر طولانی تری را برای رسیدن به سطح آب طی میکند، در نتیجه تحت تاثیر ترقیق بیشتری قرار گرفته و با غلظت کمتر و مناسب تری به سطح آب میرسد. از این نتایج میتوان برای تعیین عمق قرار گیری تخلیه-کننده در محیط دریا استفاده کرد تا با تخلیه پساب سبک در محیط میقتر، فاضلاب قبل رسیدن به سطح آب به ترقیق مناسب



شکل ۸- مقایسه خط مرکزی مسیر برای مدل عددی k-E و RNG، مدل آزمایشگاهی و مطالعات دیویدسون[۲۴]

شکل ۸ مقایسه خط مرکزی مسیر برای مدل عددی E+8 و RNG، مدل آزمایشگاهی و مطالعات دیویدسون را نشان میدهد. این نمودار مسیر خط مرکزی جت در مشاهدات آزمایشگاهی را با مطالعات پیشین و نیز شبیه سازی عددی انجام شده برای دو مدل آشفتگی K-E در سه عدد فرود دنسیمتریک، مقایسه می کند. با توجه به این نتایج میتوان دریافت که نتایج آزمایشگاهی بدست آمده دارای دقت بسیار مناسبی میباشد و به مطالعات پیشین بسیار نزدیک بوده است. مدل عددی نیز در مدلسازی مسیر حرکت جت در حالت آشفتگی K-8، نتایج نزدیکتری به مدل آزمایشگاهی نسبت به حالت آشفتگی RNG دارد که نشان میدهد مدل آشفتگی بر روی چگونگی پراکندگی آلاینده تاثیرگذار است و نتایج مدل-سازی به نوع مدل آشفتگی انتخابی حساس می باشد. استفاده از مدل آشفتگی K-E با توجه به تغییر عدد فرود دنسیمتریک و افزایش آن، قابلیت بهتری در شبیهسازی مسیر حرکت دارد و دارای نتایج دقیق تر و هزینه محاسباتی معقولانه تر میباشد [۲۴]. همچنین در اعداد فرود دنسیمتریک متفاوت نیز نتایج در Fr=20 برای همه حالات تجربی و عددی تقریبا یکسان بوده و نشان دهنده این است که با افزایش دبی و به تبع آن افزایش عدد فرود دقت نتایج در مدل عددی افزایش یافته و تطابق بعتری با مدل تجربی حاصل می گردد.

## ۴– نتیجه گیری

در این پژوهش نتایج حاصل از یک مطالعه تجربی و عددی تخلیه جت سبک در محیط ساکن دریا برای بررسی مسیر حرکت جت و تغییرات غلظت آن در مسیر ارائه گردیده است. هدف این مطالعه بررسی شرایط پخش فاضلاب شهری با شناوری مثبت و مطالعه امکان شبیه سازی عددی رویداد فوقالذکر با استفاده از بسته نرم افزاری FLOW-3D با استفاده از مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی و توسعه کاربرد این گونه مدلسازیها میباشد. در شبیه-سازی آزمایشگاهی، سه آزمایش به کمک سامانه 3D-LIF برای سه جت تخلیه با اعداد فرود دنسیمتریک ۱۰، ۱۵ و ۲۰ انجام گرفت تا نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از مدل عددی و نتایج محققان پیشین مقایسه گردد. در این نتایج مسیر حرکت جت، موقعیت نقطه برخورد و میزان ترقیق در آن نقطه تعیین گردید. در مدل عددی نیز از دو مدل آشفتگی K-E و RNG به منظور ارزیابی صحت مدل عددی در شبیهسازی استفاده شد و برای دستیابی به ابعاد مشبندی و زمان اجرا بهینه که دقت و هزینه محاسباتی قابل قبول را دارا باشد، حالتهای مختلف بررسی گردید. نتایج شبیه سازی عددی نشان میدهد که مطابقت مناسبی بین این نتایج و نتایج

آزمایشگاهی و تجربی قبلی وجود دارد. مسیر حرکت جت برای مدل عددی در دو حالت K-E و RNG با مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید. مقایسه نتایج این دو مدل آشفتگی و نتایج آزمایشگاهی نشان داد مشخص شد نتایج مدل عددی در حالت آشفتگی K-E به نتایج آزمایشها بسیار نزدیکتر است و مدل K-E قادر به مدلسازی دقیق تر مسیر حرکت جت در مقایسه با مدل آشفتگی RNG است. در اعداد فرود دنسیمتریک متفاوت نیز نتایج در Fr=20 برای همه حالات تجربی و عددی تقریبا یکسان و دارای تفاوت بسیار اندک است و نشان دهنده این میباشد که با افزایش دبی و به تبع آن افزایش عدد فرود میزان دقت نتایج در مدل عددی افزایش یافته و با مدل تجربی تطابق بهتری ایجاد مینماید. طبق این نتایج، هرچه شار مومنتم جریان خروجی بزرگتر شود با افزایش سرعت تخلیه، جت ایجاد شده به واسطه مومنتوم اولیه خود مسیر طولانی تری را برای رسیدن به مجاورت سطح طی می کند و پساب بلافاصله بعد از طى مسير بسيار كوتاهى تحت تاثير شرايط محيط پذيرنده خود قرار گرفته، غلظت آن کاهش یافته و در نهایت به غلظت محیطی که در آن تخلیه شده است، میرسد. همچنین به دلیل طی کردن مسیر طولانی تری در مخزن برای رسیدن به سطح آب، اثرات تخریب پذیر آن توسط اختلاط در محیط پذیرنده به میزان بیشتری کاهش مىيابد.

## ۵ - تشکر و قدردانی

این پژوهش در قالب پایاننامه دانشجویی و با حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل انجام پذیرفته است.

۶ – کلید واژگان

Initial Mixing

- <sup>v</sup> Far Field Mixing
- " Long Term Flushing
- <sup>+</sup> Large Eddy Simulation
- <sup>a</sup> Navier-Stokes (RANS)
- <sup>9</sup>volume flow rate

#### ۷ - مراجع

1. Roberts, D. A., Johnston, E. L., & Knott, N. A. (2010). *Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies*. Water research, 44(18), 5117-5128.

2. Roberts, P. J. W. (1989). Ocean outfalls. I: Submerged waste field formation, II: Spatial evolution of submerged wastefield, III: Effect of diffuser design on submerged wastefield. J. Hydr. Eng., 115, 1-70. 18. Fischer, H. B., List, J. E., Koh, C. R., Imberger, J., & Brooks, N. H. (2013). *Mixing in inland and coastal waters*. Elsevier.

19. Ghayour, Sh., Hamidi, M. & Abessi, O. (2019), Laboratory analysis of turbulent flows in submerged wastewater discharge of saltwater and coastal canals. Oceanographic Research Journal, 10(39), 101-111. (In Persian)

20. Abessi, O., Rahmani Firoozjaee, A., hamidi, M., bassam, M., & khodabakshi, Z. (2020). Three Dimensional Laser Scanning System for Illumination of Fluorescent flow for the Environmental Hydraulic investigations. Journal of Hydraulics, 14(4), 69-81. doi: 10.30482/jhyd.2020.105499

21. Biabani, S., Hamidi, M., & Neya, B. N. (2019). Numerical simulation of the Chute Convergence effects on Forming the Transverse Wave in Flood Evacuation Systems. Journal of Hydraulics, 14(3), 67-84. doi: 10.30482/jhyd.2019.174636.1373

22. Flow3D, Help, Ver. 11.0.4, Flow Science Inc

23. Liseth, P. (1973). *Mixing of merging buoyant jets from a manifold in stagnant receivingwater of uniform density*. In Advances in water pollution research. Proceedings of the sixthinternational conference. (pp. 921-936).

24. Davidson, M. J. (1989). *The Behaviour of Single and Multiple, Horizontally Discharged, Buoyant Flows in a Non-turbulent Coflowing Ambient Fluid:* A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering at the University of Canterbury (Doctoral dissertation, University of Canterbury). 3. Roberts, P. J. W. (1989). *Dilution hydraulic model study of the Boston wastewater outfall*. Report Number SCEGIT, 89, 101.

4. Bleninger, T., Niepelt, A., & Jirka, G. (2010). *Desalination plant discharge calculator*. Desalination and Water Treatment, 13(1-3), 156-173.

5. Sharp, J. J. (1975). *THE USE OF A BUOYANT WALL JET TO IMPROVE THE DILLUTION OF A SUBMERGED OUTFALL*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 59(3), 527-534.

6. Sharp, J. J., and Vyas, B. D. (1977). *The buoyant wall jet*. Proc. Inst. Civ.Eng. Part 2 Res. Theory, 63(3), 593–611.

7. Lin, C. Y., Holley, E. R., & Maxwell, W. (1977). Buoyant surface jets discharged into a strong crossflow. Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Report Project No B-088-ILL.

8. Abdelwahed, M.S.T., and Chu, V.H. (1981). *Surface jets and surface plumes in cross flows*. journal of hydraulic. 6 (2012) 191-193.

9. Roberts, P. J., Ferrier, A., & Daviero, G. (1997). *Mixing in inclined dense jets*. Journal of Hydraulic Engineering, 123(8), 693-699.

10. Moawad, A. K., & Rajaratnam, N. (1998). *Dilution* of multiple nonbuoyant circular jets in crossflows. Journal of Environmental Engineering, 124(1), 51-58.

11. Jirka, G. H. (2007). Buoyant surface discharges into water bodies. II: Jet integral model. Journal of Hydraulic Engineering, 133(9), 1021-1036.

12. Kim, Y. D., Seo, I. W., Kang, S. W., & Oh, B. C. (2002). *Jet integral–particle tracking hybrid model for single buoyant jets*. Journal of Hydraulic Engineering, 128(8), 753-760.

13. Van Maele, K., & Merci, B. (2006). Application of two buoyancy-modified  $k-\varepsilon$  turbulence models to different types of buoyant plumes. Fire Safety Journal, 41(2), 122-138.

14. Kim, D. G., & Cho, H. Y. (2006). Modeling the buoyant flow of heated water discharged from surface and submerged side outfalls in shallow and deep water with a cross flow. Environmental Fluid Mechanics, 6(6), 501-518.

15. Michas, S. N., & Papanicolaou, P. N. (2009). *Horizontal round heated jets into calm uniform ambient*. Desalination, 248(1-3), 803-815.

16. Liu, P., & Lam, K. M. (2015). *Large-eddy simulation of horizontally discharging sediment-laden jets*. Journal of hydro-environment research, 9(3), 388-403.

17. Kheirkhah Gildeh, H., Mohammadian, A., Nistor, I., & Qiblawey, H. (2014). *Numerical modeling of turbulent buoyant wall jets in stationary ambient water*. Journal of Hydraulic Engineering, 140(6), 04014012.