

# بررسی عوامل موثر بر توسعه جریان جتهای مستغرق در منابع آب پذیرنده ساکن

**جواد احدیان<sup>۱</sup>\* – حبیب موسوی جهرمی<sup>۲</sup>** تاریخ دریافت: ۸۸/۴/۲۳ تاریخ پذیرش: ۸۸/۸/۱۷

#### چکیدہ

در این مقاله عوامل موثر بر جریان جت مستغرق تخلیه شونده به منابع آب پذیرنده ساکن مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، کلیه پارامترهای جت، پارامترهای محیطی و پارامترهای هندسی موثر بر جریان جتهای دایرهای مستغرق، بررسی و با استفاده از آنالیز ابعادی روابط بدون بعد مربوطه استخراج شد. برای بررسی چگونگی ارتباط بین این پارامترها یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد و آزمایشهای مختلف در هندسه و جریان غلیظ متفاوت جت به طور مجموع ۲۱۵ آزمایش انجام گردید. در این تحقیق خصوصیات مهم منحنیه ای سیستم سرعت سنجی آکوستیک پروفایلر، UVDP، پروفیل های سرعت در مقاطع مختلف از جت اندازهگیری و مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی با استفاده از پروفیل های سرعت اندازه گیری شده با روابط تئوری توزیع نرمال گوسین مقایسه و مشخص شد کلیه پروفیل های سرعت اندازهگیری شده از تابع گوسین پروفیل های سرعت اندازه گیری شده با روابط تئوری توزیع نرمال گوسین مقایسه و مشخص شد کلیه پروفیل های سرعت اندازه گیری شده از تابع گوسین پروفیل های سرعت اندازه گیری شده با روابط تئوری توزیع نرمال گوسین مقایسه و مشخص شد کلیه پروفیل های سرعت اندازه گیری شده از تابع گوسین پروفیل های سرعت اندازه گیری شده با روابط تئوری توزیع نرمال گوسین مقایسه و مشخص شد کلیه پروفیل های سرعت اندازه گیری شده از تابع گوسین پروفیل های مختلف از جت نهایتاً مشخص نمود که داده های اندازه گیری شده با نتایج تئوری تطابق خوبی دارد. نتایج حاصل از این تحقیق با استفاده از مکان های مختلف از جت نهایتاً مشخص نمود که داده های اندازه گیری شده با نتایج تئوری تطابق خوبی دارد. نتایج حاصل از این تحقیق با استفاده از تحلیل آماری نشان داد که رابطه غیر خطی با دقت قابل قبولی بین خصوصیات تراژکتوری با عوامل توسعه جریان جت برقرار است. یافته ها نشان داد که به طور کلی با افزایش زاویه همگرایی جت از ۱۵ درجه به ۹۰ در حوان بی مرز بالایی تراژکتوری در حدود ۲۵ درصد، و برای مرز پایینی در دود ۲۸ درصد افزایش می یابد.

**واژههای کلیدی:** جت مستغرق، زاویه همگرایی، تراژکتوری، الگوی جریان، ضریب انتشار

#### مقدمه

با توسعه صنعت، آلودگیهای حاصل از ضایعات صنعتی بر محیط زیست تأثیر نامطلوبی را گذاشته است. بدین منظور همواره سعی می گردد که پساب ناشی از فعالیتهای کارخانهها و غیره که به ناچار به رودخانه و دریاها منتهی می شود ابتدا کمی تصفیه شده و سپس در فاصله زمانی کوتاهی با آبهای رودخانهها و دریاها مخلوط گردند، تا با کاهش غلظت از اثرات آلودگی آنها کاسته شود. یکی از راههای سریع برای رقیق نمودن آلودگیهایی که به رودخانهها یا دریاها میریزند استفاده از جتهای مستغرق متلاطم است که میتواند در فاصله زمانی نسبتاً کوتاهی مقدار زیادی آب و جریان آلودگی را به علت شرایط تلاطمی بالای خود مخلوط نموده و اثرات مخرب آن را سریعاً

۱و۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه سازههای آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

(\* - نویسنده مسئول: Email: Ja-ahadiyan@yahoo.com)

کاهش دهد. جریان خروجی جت مستغرق با سیال غلیظ باعث ایجاد منحنیهای تراژکتوری شده در این گونه جریانها مشخص نمودن طول منحنی مذکور که وابسته به غلظت و زاویه حمله جت تغییر می نماید، به لحاظ دیدگاههای مختلفی حائز اهمیت است. از طرفی لازم به توضیح است که منحنی تراژکتوری در بخشی از مسیر حرکت خود در جریان پذیرنده رو به بالا حرکت نموده که باعث اختلاط بیشتر در لایههای سطحی جریان می شود، در این گونه مواقع نیز اطلاع از وضعیت پخشیدگی سطحی نیز می تواند مفید واقع شود.

تئوری جتهای مستغرق توسط آلبرسون و همکاران (۳) که با فرضیاتی نظیر الگوی فشار هیدرواستاتیکی و تشابه پروفیلهای سرعت در مکانهای مختلف از جت منطبق بر توزیع گوسین ارائه شده است، ضریب انتشار جت برای سرعت و غلظت بررسی نیز شده است. بر اساس تحقیقات دل بن و همکاران (۵) اختلاف دانسیته بین سیال جت و سیال پیرامون در قسمت ورودی و در لایههای سطحی جریان باعث افزایش طول اختلاط اولیه می شود. در برخی از

فعالیت های مهندسی غلظت جریان جت را به گونه ای کنترل مینمایند که تراژکتوری حاصل (Trajectory) به سمت جلو رانده شود. در تحقیقات تورنر (۱۲) و کونز (۱۰) پخشیدگی ناشی از شوری و دما برای جتهای مستغرق بررسی شده است. در تحقیقات ایشان مشخص شده است درحالتی که جریان پیرامون تقریباً ساکن باشد، پخشیدگی مولکولی گرما از نمک بیشتر بوده که منجر به تشکیل پدیدهٔ salt-fingering گشته که در بالای لایه گرم و شور به وقوع می پیوندد بررسی عددی و کمی این پدیده توسط کونز (۱۰) برای جریانات ساحلی انجام شده است. در پدیدهٔ Salt-fingering منحنی تراژکتوری که دارای شرایط متفاوتی نسبت به سیال پیرامون است، بررسی می شود. تحقیقات ماکسوارتلی (۱۱) و تورنر (۱۱) مشخص نمود که اختلاط جریان جت در عدد رینالدز پائین (R) در فاصلهای مشخص خاتمه یافته و منحنی تراژکتوری ایجاد میشود. آزمایشها و تحقیقات مشابه در اعداد رینالدز بالاتر و در حالت دو بعدی و سه بعدی تاکنون گزارش نشدهاست. بر اساس تحقیقات فیشر (۶) بازههای توربولنت در پخشیدگی مضاعف ناشی از شوری و دما برای جریان پیرامون ساکن، چندان مورد نیاز نیستند، چرا که در طبیعت این گونه جریانها در شرایط تقریباً آرام در منابع آب پذیرنـده تخلیـه می گردند. بررسی رفتار جتهای مستغرق در جریان های لایه بندی شده از قبیل سواحل دریا و یا مخازن پشت سدها به صورت تئوری و آزمایــشگاهی توســط جیر کــا (۷ و۸) انجــام شــده اســت. تخلیــه فاضلابهای خانگی و صنعتی به خلیجها و نواحی ساحلی و همچنین انتشار آلودگی ناشی از دود نیز از جمله جریان های لایه بندی شده است که در مسائل زیست محیطی از اهمیت قابل ملاحظه ای برخوردار میباشد. وی جریان جت مستغرق منفرد و چندگانه را شبیه سازی ریاضی نمود و نتیجه گیری کرد برای ناحیه نزدیک جت که هنوز اختلاط کاملی میان جریان جت و سیال پذیرنده رخ نداده است، مى توان از مدل انتگرالى با دقت قابل قبـول بهـره جـست. احـديان و موسوی (۱) از دادههای آزمایشگاهی برای بررسی تراژکتوری ایجاد شده در اثر جریان خروجی در پایین دست نیروگاهها استفاده و به صورت آماری روابط با ضریب همبستگی قابل قبولی را بـرای معادلـه منحنی تراژکتوری ارائه نمودند. همچنین آنها با استفاده از مدل ریاضی Flow-3D تغییرات مومنتم در فلاکس جت را با استفاده از شبیه سازی ریاضی معادلات حاکم بررسی نمودند که بر اساس نتایج آنها مومنتم جریان جت در طول فلاکس جت، رو به کاهش می باشد. تحقیقات کاتبرسون و همکاران (۴) بر مبنای ترسیب ناشی از پساب جریان خروجی از جتهای دایره ای مستغرق را که به صورت افقـی در منبع آب پذیرنده تخلیه می گردید پایهگذاری گردید. آنها رفتار متوسط رسوب گذاری ناشی از جریان جت مستغرق را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. بر اساس نتایج پژوهش این محققین رسوب گذاری ناشی از جریان جت به سه پارامتر اساسی نیروی مومنتم، شناوری

فلاکس جریان جت و خصوصیات سرعت سقوط ذرات رسوبی موجـود در پساب و همچنین سرعت جریان پذیرنده وابستگی شدید دارد.

# مواد و روش ها

### بسط مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق اثر پارامترهای جت، محیطی و هندسی بر خصوصیات منحنی پایین افتادگی بررسی شده است. در این راستا طولی که در آن منحنی تراژکتوری رو به بالا حرکت می کند که از آن به عنوان طول شناوری مثبت (X) یاد می شود، نیز در مطالعه حاضر بررسی شده است. جهت نیل به هدف این تحقیق یک مدل فیزیکی به طول ۳/۲ متر، به عرض ۶/۰متر و به ارتفاع ۲/۹۵ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز به همراه تجهیزات مربوطه ساخته شد. شکل (۱) پلان و پروفیل طولی این مدل آزمایشگاهی را نمایش میدهد.

جهت انجام آزمایشها تجهیزاتی که مورد استفاده قرار گرفتند و ساخته شدند، شامل فلوم آزمایشگاهی، مخزن ذخیره سیال تزریق جت، حوضچهٔ و پمپ تامین آب جریان پذیرنده، پمپ تزریق جت، پمپ اختلاط سیال جت و ارابهٔ مستقر بر روی فلوم جهت اندازه گیری سرعت و غلظت در مکان های مختلف از محل جت بود. وسایل اندازه گیری پارامترهای مختلف شامل، دبی سنج دقیق با دقت ۲/۲ درصد برای اندازه گیری دبی جریان جت، دانسیته متر برای اندازه گیری تغییرات جرم حجمی سیال در طول فلاکس جت، دماسنج برای اندازه گیری دمای سیال جت و سیال پذیرنده، point gage برای برداشت حد بالایی تراژکتوری جریان جت و دستگاه سرعت سنج زاویهای DOP2000 بود. از طرفی به فاصله هر ۱۵ سانتیمتر یک خط کش دقیق با دقت ۱ میلیمتر و به ارتفاع ۱ متر، چاپ شده بر روی كاغذ روغنى شفاف بر روى ديوارة فلوم كه از جنس پلكسى كلاس ساخته شده بود، چسبانیده شد، همچنین خط کشهای طولی در سراسر فلوم برای اندازه گیری طول طی شدهٔ تراژکتوری در نظر گرفته شد.

در طی انجام آزمایش ها مطابق با شکل ۱ سیال پذیرنده از طریق مخزن تامین و پمپ، به فلوم منتقل می شد و تا ارتفاع معلومی فلوم را پر می نمود. از طرفی جریان جت نیز از طریق مخزن تزریق و پمپ مربوطه به درون فلوم آزمایشگاهی منتقل می شد. اندازه گیری ها شامل طول و ارتفاع تراژ کتوری در سرعت های ورودی مختلف سیال جت، سرعت در مکان های مختلف از محل جت، غلظت و دمای سیال تزریق شونده، غلظت و دما در مکان های مختلف از محل جت در امتداد خط کش های نصب شده بر روی دیوارهٔ فلوم، دبی جریان جت و همچنین غلظت و دمای منبع آب پذیرنده بود. کلیه دیواره های جانبی فلوم از جنس پلکسی گلاس ساخته شد.



(شکل ۱)- (a) پلان (b) مقطع طولی مدل أزمایشگاهی تزریق جریان جت در جریان پذیرنده

تزریق انتقال داده می شد. دانسیته سیال جت از طریـق محاسـباتی با روش شناوری و اندازه گیری آزمایشگاهی با استفاده از هیدرومتر دقیق ۱۵۱۲ اسناندارد شده در یـک دمای مشخص محاسـبه و برداشت می شد. از طرفی با توجه به تأثیر دما بر دانسیته آب نمک و همچنین پخشیدگی مولکولی، در کلیه آزمایش ها اختلاف دمایی بـین منبع آب پذیرنده و مخزن جت صفر در نظر گرفته شد تـا از تـأثیر ایـن پدیـده ممانعت به عمل آید. برای ایـن منظـور فلـوم آزمایـشگاهی و مخـزن تزریق به صورت همزمان و از یک منیع تأمین آب پـر می گردیـد. بـا استفاده از CE متر دقیق دیجیتالی پرتابل با دقـت ۰/۱ میکـروزیمنس بر سانتیمتر که دارای سنسور اندازه گیری دما نیـز بـود، CE و دمـای لحظهای آب نمک مخزن تزریق و آب فلوم اندازه گیری می شد. در هر آزمایش برای اطمینان از همگن بودن محلـول آب نمـک در مجمـوع آزمایش ها با دو دوربین دقیق دیجیتالی با وضوح دیدار ۲ مگا پیکسل، که در موقعیت ثابت و معلوم نسبت به فلوم و نسبت به یکدیگر قرار داشتند، تصویربرداری شد؛ به طوری که، تراژکتوری حاصل از جت با استفاده از تصاویر برداشت شده کنترل و اندازه گیری مجدد میشد. از طرفی بر روی مسیر خط لوله انتقال جریان جت به درون فلوم، یک فلومتر دقیق ۲ اینچ الکترومغناطیس مدل مگاب ۲۰۰۰ با دقت نسبی ۲/۰ درصد، با شرایط استاندارد و کنترل کارخانهای نصب و دبی جریان جت به صورت لحظهای در طول هر آزمایش برداشت میشد. همچنین مخزن تزریق جریان جت بصورت مکعب مستطیل ساخته شد و حجم آن در ارتفاعهای مختلف با نصب اشل استاندارد مشخص گردید. با توجه به حجم مزبور میزان مشخص از نمک در مخزن جداگانهای حل و پس از حل کامل به درون مخزن

برای ۲۷ نقطهٔ (۳ نقطه در طول، ۳ نقطه در عرض و ۳ نقطه در ارتفاع) مخزن تزریق، به صورت پیوسته اندازه گیری شوری و دما انجام می شد؛ لازم به توضیح است که یک پمپ جداگانه متصل به مخزن تزریق، وظیفه اختلاط و چرخش سیال مخزن تزریق را بر عهده داشت. برای کنترل غلظت جریان جت، و اندازه گیری غلظت در مکان های مختلف از محل جت رابطه بین EC و غلظت برای دماهای مختلف اندازه گیری و محاسبه شد و با استفاده از این ارتباط میزان رقیق شدگی در مکان مورد نظر محاسبه می گردید.

#### آناليز ابعادى

با توجه به پارامترهای حاکم بر پدیده جریان جت و به منظور دستیابی به روایط حاکم بصورت عبارات بدون بعد در این تحقیق، اقدام به آنالیز ابعادی بین پارامترهای موثر در این پدیده شد. پارامترهای موثر در حرکت سیال جت در سیال پذیرنده عبارتند از:

$$f(\rho_{a}, \mu_{j}, u_{0}, u_{m}, d_{p}, D_{i}, x, X, X_{\max}, X_{\min}, \rho_{j}, g, Z_{u}, Z_{0}, Z_{2}, \theta_{c}, c_{0}, c_{m}) = 0$$
(1)

در معادلهٔ (۱)،  $\rho_a$ ، جرم حجمی سیال پیرامون،  $\mu_j$ ، لزجت مطلق اولیه سیال جت، 0، سرعت اولیه ورودی جت،  $u_m$ ، سرعت خط مرکزی در مکانهای مختلف از محل جت، qb، قطر جت، Di قطر ورودی قبل از جت، x فاصله طولی فلاکس جریان جت از محل جت، X، فاصلهای که تا آن فلاکس جریان جت (تراژکتوری) رو به بالا  $X_{\min}$ ، کرکت می کند،  $X_{\max}$ ، طول نهایی مرز بالایی تراژکتوری) رو به بالا طول نهایی مرز پایینی تراژکتوری،  $\rho_i$ ، جرم حجمی سیال جت، g، شتاب ثقل،  $Z_u$  ارتفاع مرز بالایی فلاکس جت،  $Z_i$  ارتفاع محل جت در بالاترین قسمت قطر،  $Z_2$ ، ارتفاع مرز پایینی فلاکس جت،  $\theta_c$ 

زاویه همگرایی برای نازل جت، د۰۵ غلظت اولیه سیال جت و د۰ غلظت خط مرکزی تراژکتوری در مکانهای مختلف از جت می باشد. شکل (۲) برخی از پارامترهای تعریف شده در این مقاله را به نمایش گذاشته است. با استفاده از آنالیز ابعادی بین پارامترهای فوق، روابط بدون بعد زیر برای این پدیده استخراج شد:

$$f(\frac{\rho_j U_0 d_p}{\mu_j}, \frac{U_0}{\sqrt{(\frac{\Delta\rho}{\rho_a} g d_p)}}, \frac{(Z_0 - Z_u)}{x}, \frac{Z_u}{d_p}, \frac{Z_2}{d_p}, \frac{Z_2}{\chi})$$

$$(Y)$$

 $\frac{x}{d_{p}}, \frac{X}{d_{p}}, \frac{X_{\max}}{d_{p}}, \frac{X_{\min}}{d_{p}}, \frac{D_{i}}{d_{p}}, \theta_{c}, \frac{u_{m}}{u_{0}}, \frac{c_{m}}{c_{0}}) = 0$ c, aslche (Y)  $\psi(r)$   $\psi(r)$   $\psi(r)$   $\psi(r)$ 

در معادله (۱) پارامتر اول به عدد رینالدز قلا حس ورودی، پارامتر دوم عدد فرود دنسیمتریک جریان جت، پارامتر سوم نسبت شناوری فلاکس جت، پارامتر چهارم نسبت ارتفاعی مرز بالایی فلاکس جت، پارامتر پنجم نسبت ارتفاعی مرز پایینی فلاکس جت، پارامتر ششم نسبت طولی جریان پیش رونده فلاکس جت (تراژکتوری)، پارامتر هفتم نسبت طولی بخش شناوری مثبت، پارامتر هشتم نسبت طول کلی مرز بالایی تراژکتوری، پارامتر نهم نسبت طول کلی مرز پایینی تراژکتوری، پارامتر دهم عدد هندسه جت، پارامتر یازدهم زاویه همگرایی جت و پارامترهای دوازدهم و سیزدهم نسبت سرعت و فلظت خط مرکزی تراژکتوری در مکانهای مختلف از محل جت به سرعت و غلظت اولیه میباشد. با توجه به این روابط در کلیه آزمایشها انجام شده پارامترهای مختلف در روابط بدون بعد تمامی آزمایشها عدد رینالدز در محدوده جریان متلاطم قرار داشت؛ بنابراین، در ارائه نتایج از بررسی عدد رینالدز صرف نظر شده است.



(شکل۲)- نمایش تراژکتوری جریان جت به همراه پارامترهای مربوطه

در شکل ۲ محور ۲ مختصاتی منطبق بر محل جت و مبدا مختصات در راستای محور جت و منطبق بر کف فلوم آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. همانطوری که در این شکل مشخص شده است، طولی که تراژکتوری در آن رو به بالا حرکت می کند، با تغییر علامت دادن (zo-zu) قابل محاسبه میباشد. در حالتی که حد بالایی منحنی تراژکتوری نسبت به محل جت افزایش عمق نشان میدهد، منحنی تراژکتوری نسبت به محل جت افزایش عمق نشان میدهد، تراژکتوری در این حالت X نامگذاری شده است. کلیه آزمایشها در سه قطر ۵، ۸ و ۱۵ میلیمتر برای جت، چهار غلظت اولیه ۱۵، ۳۰، ۵۰ و ۲۰۰ گرم بر لیتر ، در پنج زاویه همگرایی ۱۵، ۳۰، ۵۵، ۶۰ و ۹۰ درجه و در چهار سرعت اولیه جت حدود ۱۵، ۱۰، ۵۸، ۶۰ و در مجموع ۲۱۵ آزمایش صورت پذیرفت. از طرفی تمامی آزمایشها در دمای یکسان برای جریان جت و منبع آب پذیرنده انجام شد. این

انجام آنها با استفاده از دماسنج و هیدرومتر، دما و دانسیته هر دو جریان جت و منبع آب پذیرنده (Ambient flow) اندازه گیری و کنترل می شد.

#### نتايج و بحث

### منحنىهاى تراژكتورى

منحنیهای تراژکتوری برای کلیه اجراهای آزمایشگاهی ثبت و ترسیم گردیدند. این منحنیها برای سه قطر، چهار سرعت ورودی حدود ۰، ۰، ۱، ۰/۱ و ۲ متر بر ثانیه در چهار غلظت با پنج زاویه همگرایی ترسیم شدند. نتایج حاصله برخی از این منحنیها در شکل (۳) که برای سرعت ووردی ۰/۵ و ۲/۰ متر برثانیه برای قطر ۱۵ میلیمتر، غلظت ۱۵ گرم بر لیتر و در دو زاویه همگرایی ۱۵ و ۹۰ درجه است آمده است.



(شکل ۳)- نتایج تراژکتوریهای جت برای قطر ۱۵ میلیمتر، غلظت g/L ۱۰ و در سرعت ورودی m/s ۳/۵ در زاویههای همگرایی مختلف (الف) زاویه همگرایی ۱۵ درجه (ب) زاویه همگرایی ۳۰ درجه (ج) زاویه همگرایی ۲۰ درجه (د) زاویه همگرایی ۹۰ درجه

(جدول ۱) – نتایج تغییرات طول تراژکتوری نسبت به زاویه همگرایی جت									
U <sub>0</sub> m/s	θ	Xmax mm	Xmin mm	X/dp	U <sub>0</sub> m/s	θ	Xmax mm	Xmin mm	X/dp
	۱۵	۶۴۰	۴۸۰	۲١/۵۵		۱۵	120.	۱۰۸۰	<b>۲</b> ۶/۹۱
	۳۰	۵۲۰	48.	۲۰/۴۳		۳۰	148.	177.	<b>YY/</b> ۴۹
۰/۴۸	۴۵	۶۱۰	48.	<b>7</b> 3/84	۱/۵۸	۴۵	1420	173.	۸۴/۳۵
	۶.	54.	۴۸۰	Y0/0Y		۶.	۱۳۸۰	۱۱۸۰	۹٣/۴۲
	٩٠	۷۸۰	۶۲۰	۲۵/۷۸		٩٠	100.	۱۳۸۰	۱۰۲/۰۸
•/۹٧	۱۵	۹۲۰	۷۸۰	۵۷/۶۱		۱۵	۱۷۸۰	1880	۸۰/۷۲۱
	۳۰	1.2.	٨٠٠	54/55	४/•९	۳۰	۱۹۰۰	1810	١٣٩/۶٨
	۴۵	۱۱۳۰	٩٣٠	54/04		۴۵	۱۹۸۰	178.	146/78
	۶.	110.	٩۴٠	۵۷/۳۴		۶.	۲۰۰۵	172.	127/18
	٩٠	17	۱۰۲۰	VT/22		٩٠	77	140.	103/05

۱۸۴ نشریه آب و خاک(علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۳ ، شماره ۴ ، سال ۱۳۸۸

در شکل ۳ نتایج منحنی تراژکتوری برای سرعت ورودی جت ۱/۵۵ متر بر ثانیه در زاویههای همگرایی ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نمایش داده شده است. طول Xmax و Xmin در زاویه همگرایی ۱۵ درجه به ترتیب برابر با ۱۲۵۰ و ۱۰۸۰ میلیمتر بدست آمده است و این در حالی است که برای زاویه همگرایی ۹۰ درجه این مقادیر به ترتیب ۱۵۵۰ و ۱۳۸۰ میلیمتر می باشند. همچنین برای کلیه سرعت های ورودی جت، مشخص گردید که با افزایش زاویه همگرایی طول منحنی تراژکتوری برای هر دو مرز پایینی و بالایی افزایش مییابد. از طرفی ارتفاع مرز بالایی منحنی تراژکتوری (Zu) نیز تقریباً با افزایش زاویه افزایش می یابد. دلیل عمده ارتباط طول منحنی تراژکتوری با زاویه همگرایی را میتوان، افزایش مومنتم فلاکس جت در اثر افزایش زاویه همگرایی دانست. نیروی مومنتم عامل اصلی قدرت جریان جت در سیال پذیرنده می باشد که با افزایش زاویه همگرایی افزایش یافته و باعث می شود که فلاکس جریان جت به جلو رانده شود. بنابراین افزایش زاویه همگرایی تأثیر معنیداری بر طول منحنی تراژکتوری (x در اشکال فوق) خواهد داشت. همچنین افزایش سرعت ورودی و به تبع آن افزایش عدد فرود دنسیمتریک، نیز طول منحنی تراژکتوری را به طور قابل توجهی افزایش خواهد داد. به دلیل کثرت بسیار زیاد نتایج آزمایشگاهی نمونه ای از محاسبات و نمودارها ارائه شده است.

سیال جت و سیال پذیرنده همفاز بوده و به دلیل اختلاف دانسیته نسبی بین آنها، جریان جت در سیال پذیرنده پخش شده که دو z با تفاوت معنی دار را باعث میشود. اگر سیال جت در هوا (غیر مستغرق) انتشار یابد پخشیدگی ایجاد نخواهد شد. به طور کلی در محاسبات انجام شده برای نیروی شناوری دو ناحیه قابل تفکیک است. ناحیه اول دارای شناوری مثبت بوده که باعث میشود مرز بالایی منحنی تراژ کتوری نسبت به مرکز جت بالاتر رود. همچنین در سرعتهای از تزریق شونده بیشتر به دلیل افزابش تنشهای اصطکاکی که ناشی از گرادیان فشاری است. میزان شناوری مثبت بیشتر است. در ناحیه دوم

نیروی شناوری منفی حاکم بوده به طوری که وزن سیال تزریق شونده نسبت به نیروهای شناوری و هیدرودینامیکی جریان بیشتر بوده و منحنی پایین افتادگی را باعث می گردد. در این ناحیه اختلاط کاملی بین سیال جت و سیال تزریق شونده به دلیل گسترش فلاکس جریان جت بوجود می آید.

## طول شناوری مثبت و حداکثر طول مرز بالایی و پایینی تراژکتوری

همان گونه که در بخش های گذشته نیز عنوان گردید، طول شناوری مثبت، X، (طولی که در آن منحنی تراژکتوری رو به بالا حرکت می کند)، از خصوصیات مهم منحنی های پایین افتادگی جریان جت به شمار می رود. در این راستا برای کلیه داده های آزمایشگاهی تغییرات این طول و طول های Xmax و Min محاسبه و در مقابل عدد فرود دنسیمتریک برای زاویه های همگرایی مختلف ترسیم شدند. جدول ۱ نمونه ای نتایج تغییرات Xmax و Min و طول شناوری مثبت نسبت به زاویه همگرایی برای جت ۱۵ میلیمتری و غلظت ۱۵ گرم بر لیتر در زاویه های همگرایی مختلف را نمایش می دهند.

با مقایسه مقادیر جدول ۱ و همچنین برای دیگر حالات اجراهای آزمایشی مشخص شد که طول نهایی تراژکتوری برای مرز بالایی (Xmax) در حدود ۲۵ درصد برای تغییر زاویه همگرایی از ۱۵ به ۹۰ درجه افزایش می یابد. این در حالی است که طول نهایی مرز پایینی (Xmin) برای تغییر زاویه از ۱۵ به ۹۰ درجه در حدود ۲۸ درصد افزایش می یابد. برای کلیه دادههای آزمایشگاهی تغییرات این پارامترها نسبت به عدد فرود دنسیمتریک و زاویه همگرایی بررسی شد. شکل (۴) تغییرات این پارمترها را نسبت به عدد فرود دنسیمتریک و زاویه همگرایی نمایش می دهد.



(ج) حداکثر طول مرز پایینی تراژکتوری (شکل ٤)- تغییرات خصوصیات تراژکتوری نسبت به عدد فرود دنسیمتریک

با توجه به شکلهای فوق خصوصیات تراژکتوری با افزابش عدد فرود افزایش مییابد. از طرفی در یک عدد فرود دنسیمتریک مساوی نیز با افرابش زاویه همگرایی این خصوصیات افزایش مییابد. برای مشخص نمودن رابطه ریاضی بین پارامترها از نرم افزار آماری SPSS بهره گرفته شد؛ به گونهای که روشهای مختلف خطی و غیر خطی مورد آزمون آماری با پارامترهای وابسته قرار گرفت و نهایتاً مدلهای غیر خطی زیر برای پارامترها استخراج شد.

$$\frac{X}{d_p} = a \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_a}\right)^b + c \cdot \left(Fr_j\right)^e + g(\theta)^h + k\left(\frac{D_i}{d_p}\right)^L \quad (\ref{eq:scalar})$$

$$\frac{X_{\max}}{d_p} = a \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_a}\right)^b + c \cdot \left(Fr_j\right)^e + g(\theta)^h + k\left(\frac{D_i}{d_p}\right)^L \quad (\ref{eq:scalar})$$

همگرایی بر حسب درجه در روابط بالادر نظر گرفته شده است. بر اساس روابط استخراج شده اقدام به میزان دقت آنها به روش MSE (Mean of Square Error) که دقت پارامترهای آماری را به خوبی تخمین میزند، گردید. بر این اساس خطای برآورد شده برای رابطه (۳) ۱۵ درصد، برای رابطه (۴) ۱۴ درصد و برای رابطهٔ (۵) ۱۲ درصد محاسبه شد. شکل ۵ کلیه مقادیر اندازه گیری شده را در مقابل مقادیر محاسباتی برای کلیه دادههای آزمایشگاهی با استفاده از فرمول ۱ نمایش میدهد.



موں ۱۱ – محمیل صرایب پارامترهای بدوں بعد	بدون بعد	يارامترهاي	ضرايب	)_ تخمين	جدول ۲
--	----------	------------	-------	----------	--------

(شکل ۵)- نمایش مقادیر محاسباتی و اندازه گیری شده برای طول نسبی شناوری مثبت

همچنین در این تحقیق حدود ۲۰ درصد داده های آزمایشگاهی جدا شد و مدلهای آماری یاد شده برای هر سه پارامتر طول شناوری

مثبت، طول نهایی مرز بالایی و طول نهایی مرز پایینی تراژکتوری با استفاده از نرم افزار SPSS مجدداً اجرا گردید. در این حالت ضرایب ارائه شده در جدول (۲) مقدار ناچیزی تغییر یافت. در این حالت نیز برای ۲۰ درصد داده آزمایشگاهی یاد شده پارامترهای فوق محاسبه گردید و خطای رابطه ها برآورد شد. بر اساس نتایج بدست آمده باری طول شناوری مثبت روابط ارائه شده (بدون احتساب ۲۰ درصد دادهها) ۷۱درصد خطا، طول نهایی مرز بالایی ۱۳ درصد خطا و طول نهایی مرز پایینی حدود ۱۲درصد خطا بدست آمد؛ لذا، مدلهای آماری برآورد طول شناوری مثبت، طول نهایی مرز بالایی و طول نهایی مرز پایینی با دقت قابل قبولی قادر به پیش بینی بوده به طوریکه بر اساس نتایچ، کلیه دادههای محاسباتی در مقابل مقادیر اندازه گیری شده آنها بر روی خط ۴۵ درجه واقع شدند.

# پروفیلهای سـرعت و غلظـت و مقایـسه آنهـا بـا معـادلات تئوری

مطابق با آنچه که در بخشهای گذشته ارائه شد، برای تشخیص الگوی جریان اقدام به اندازه گیری پروفیل سرعت در مکانهای مختلف برای هر اجرای آزمایش گردید. بر این اساس از سیستم سرعت سنجی UVDP با استفاده از دستگاه DOP2000 پروفیل سرعت اندازه گیری گردید. شکل (۶) این دستگاه را به همراه ارابه سه بعدی ساخته شده به این منظور نمایش میدهد.

این دستگاه با استفاده از ترانس دیوسر که نسبت به جهت جریان با زاویهای بین ۶۰ تا ۸۰ درجه قرار گیرد به روش آکوستیک پروفیل سرعت را اندازهگیری مینماید. ارابه سه بعدی ساخته شده به این منظور قادر به حرکت در سه جهت مختصاتی و تنظیم زاویه قرارگیری ترانس دیوسر نسبت به افق بود. روش مورد استفاده در این تحقیق Multiplexer بود که به طور همزمان شش ترانس دیوسر وظیفه اندازهگیری سرعت را بر عهده داشت. با توجه به متفاوت بودن مقدار



سرعت در اجراهای مختلف آزمایشگاهی تنظیمات دستگاه که شامل فرکانس صاتع کننده و فرکانس تکرار پالس بود تنظیم و عمل برداشت انجام می گردید. لازم به توضیح است که برای افزایش دقت تا حد ممکن برای هر مکان قرار گیری ترانس دیوسرها در مجموع ۱۲۸ پروفیل با فاصلهٔ زمانی ۱۰ میلی ثانیه برداشت و در نهایت از همگی آنها متوسط گرفته شد. شکل (۷) پروفیلهای برداشت شده در فواصل مختلف از جت ۵ میلیمتری با زاویه همگرایی ۴۵ درجه در غلظت ۱۵ گرم بر لیتر و برای سرعت اولیه ۰/۹۷ متر بر ثانیه نمایش می دهد.

شکل ۷ بخش (الف) مربوط به پروفیل های سرعت اندازه گیری شده برای جت ۵ میلیمتری با شرایط ارائه شده میباشد. مقادیر x درج شده بر روی این شکل ها مربوط به فاصله پروفیل اندازه گیری شده از محل جت میباشد. بخش (ب) این شکل تئابع تئوری گوسین مربوط به هر یک از پروفیل ها را نمایش میدهد. همان گونه که مشاهده میشود، توزیع گوسین با پروفیل های اندازه گیری شده تطابق بسیار مناسبی دارد. از این رو معادلات حاکم بر جریان جت که با استفاده از توزیع های نرمال گوسین بسط داده می شوند، برای شبیه سازی خصوصیات مهم هیدرولیکی جریان جت های بکار رفته در این تحقیق قابل کاربرد میباشند. بر اساس این تئوری که اولین بار توسط آلبرسون و همکاران (۳) ارائه شده است، خصوصیات جت به صورت ماکزیمم به غلظت اولیه جت ارائه می شوند. این معادلات به شرح زیر هستند:

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{1}{\sqrt{2\beta}} \left(\frac{x}{d_p}\right)^{-1}$$

$$\frac{c_m}{c_0} = \frac{1 + \lambda^2}{2\sqrt{2\lambda^2\beta}} \left(\frac{x}{d_p}\right)^{-1}$$
(Y)







(ب)

(الف)

(شکل ۷)- نمایش پروفیلهای سرعت در مکانهای مختلف برای یک آزمایش



(شکل ۹)- انطباق دادههای اندازه گیری غلظت خط مرکزی تراژکتوری در مقایسه با معادلات تئوری

در رابطه های فوق ضرایب  $\beta$  و  $\Lambda$  ضریب انتشار سرعت و غلظت بوده که مقادیر آنها توسط محققین مختلفی از جمله آلبرسون و همکاران (۳) به میزان ۲/۱۱۴ و ۲/۲ برآورد شده است. البته این ضرایب توسط محققین زیادی مورد مطالعه قرار گرفته است که اکثراً دارای تفاوت کمی نسبت به این مقادیر هستند. داده های حاصل از این تحقیق نیز با معادلات فوق الذکر مورد مقایسه قرار گرفتند که مشخص گردید بین داده های اندازه گیری شده در این تحقیق و این معادلات همبستگی قابل قبولی برقرار می باشد. شکل (۸) برخی از داده های اندازه گیری شده در این معادله (۴) ماه رو می شره در این معادله (۲) مراه می می دهد.

در شکل ۸ خط پر رنگ مربوط به ترسیم معادله (۶) بوده و دادههای اندازه گیری شده با نقاط نمایش داده شدهاند. لازم به توضیح است که حداکثر مقدار مشاهده شده px/d در آزمایشات این تحقیق در حدود ۳۸۵ بوده و این در حالی است که حداقل مقدار اندازه گیری شده سهرس در حدود ۰/۰۲۵ میباشد. همچنین حداکثر غلظت خط مرکزی تراژکتوری نیز در تمامی آزمایشات در مکانهای مختلف از محل جت برداشت گردید و با رابطه تئوری (۲) مقایسه شد. شکل (۹) انطباق دادههای اندازه گیری شده این تحقیق را با معادله (۵) برای چهار اجرای آزمایشی نمایش میدهد.

### نتيجه گيرى

در این تحقیق عوامل موثر بر توسعه جریان جتهای مستغرق بررسی شد که خلاصه نتایج بدست آمده به صورت زیر می باشد.

بررسی سد که کارکنه سیج بدست اسده به صورت زیر هی بست. ۱- مطابق با بررسی های انجام شده با افزایش عدد فرود دنسیمتریک و همچنین زاویه همگرایی طول نسبی شناوری مثبت، طول نهایی مرز افزایش ایـن دو عامل باعـث افـزایش نیـروی مـومنتم گردیـده کـه مهمترین پارامتر توسعه فلاکس جریان جت مـی باشـد. افـزایش عـدد فرود با کاهش دانسیته، کاهش قطر جـت و یا بـه عبارتی افـزایش سرعت ورودی امکان پذیر است. با کاهش دانسیته نیروی وزن سیال به بالا هدایت می کند، و این در حالی است که با کاهش قطر فلاکس جریان جت با ضخامت کمتـری حادث شـده و نیروهای اصطکاکی مقابل جریان کاهش می یابد و از طرفی سرعت ورودی افـزایش یافتـه مقابل جریان کاهش می یابد و از طرفی سرعت ورودی افـزایش یافتـه که باعث پیشروی فلاکس جریان می شود.

۲- با افزایش زاویه همگرایی طول منحنی تراژکتوری برای هر دو مرز پایینی و بالایی افزایش مییابد؛ به طوری که، برای تغییر زاویه همگرایی از ۱۵ به ۹۰ درجه مقدار طول نهایی مرز بالایی تراژکت وری (Xmax) در حدود ۲۵ درصد، افزایش مییابد. این در حالی است که طول نهایی مرز پایینی برای تغییر زاویه از ۱۵ به ۹۰ درجه در حدود ۲۸ درصد افزایش مییابد. این موضوع برای کلیه سرعتهای ورودی یکسان است.

۳- خصوصیات مهم منحنی تراژکتوری جریان جت مستغرق اعم از طول شناوری مثبت، حداکثر طول مرز بالایی تراژکتوری و حداکثر طول مرز پایینی تراژکتوری به صورت آماری با استفاده از روش غیر

خطی که دارای کمترین خطا بود بررسی شد و مشخص گردید که مدل های آماری ارائه شده در این تحقیق با دقت رضایت بخشی قادر به برآورد خصوصیات مهم تراژکتوری میباشند.

۴- الگوی جریان جت با استفاده از اندازه گیری پروفیل سرعت در مکان های مختلف از محل جت مشخص نمود که داده های حاصل از این تحقیق با توزیع نرمال گوسین تطابق بسیار بالایی داشته و از این رو معادلات حاکم مربوطه که شامل معادلات نسبت سرعت مرکزی به سرعت اولیه و همچنین معادلات رقیق شدگی است برای بررسی و مقایسه شرایط تئوری و آزمایشگاهی بکار گرفته شد.

۵- طول نسبی شناوری مثبت، X/dp ، در کلیه آزمایشها برای تغییر زاویه از ۱۵ درجه به ۹۰ درجه بین ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش مییابد. این در حالی است که برای تغییر زاویه از ۱۵ به ۳۰، ۴۵ و ۶۰ برای تمامی سرعتهای ورودی این تغییرات در حدود ۱۰ درصد میباشد. این موضوع به دلیل فشردگی بیشتر جریان برای زاویه ۹۰ درجه میباشد.

۶- منتجه نیروهای شناوری و اصطکاک به همراه نیروهای مومنتم (جلوبرنده) بر طول کلی منحنی تراژکتوری در منابع آب پذیرنده تأثیر بسزایی دارد، و این در حالی است که نیروی شناوری به ابعاد فلاکس، نیروی اصطکاکی درگ به سطح پیشانی جریان فلاکس و نیروی مومنتم به سرعت ورودی فلاکس و زاویه همگرایی جت وابسته است.

# تشکر و قدردانی

از سازمان آب و برق خوزستان معاونت سد و نیروگاه بـه واسـطهٔ پشتیبانی مالی از این تحقیق قدردانی میگردد.

### منابع

- ۱۰- احدیان ج.، موسوی جهرمی س.ح. ۱۳۸۷. شبیه سازی خصوصیات جت مستغرق پایین دست نیروگاهها با استفاده از گرادیان حرارتی. مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاههای برق آبی تهران. اردیبهشت ۸۷.
- FLOW-3D احدیان ج.، موسوی جهرمی س.ح. ۱۳۸۷. بررسی تغییرات مومنتم جریان جت ورودی در منابع آب پذیرنده کم عمق با استفاده از FLOW-3D ، مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی منابع آب ایران. تبریز مهر ۸۷.
- 3- Albertson M.L., Dai Y.B., Jenson R.A., and Rouse H. 1950. Diffusion of submerged jets. Trans. Am. Soc. Civ. Eng., 115:639-664.
- 4- Cuthberston Alan J.S., Peter A., and Davis P.A. 2008. Deposition from Particle-Laden, round, turbulent, horizontal, buoyant jets in stationary and coflowing receiving fluids. J. Hydraul. Eng., 134 (4):390-402.
- 5- Del Bene J.V., Jirka G., and Largier J. 1994. Ocean brine disposal. Desalination, 97(1-3):365-372.
- 6- Fischer H.B. 1971. The dilution of an undersea sewage cloud by salt fingers. Water Res., 5:909-915.
- 7- Jirka G.H. 2004. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part 1: Single round jet." Environm'l Fluid Mech., 4, 1-56.
- 8- Jirka G.H. 2006. Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part 2: Plane jet dynamics resulting from multiport diffuser jets. Environm'l Fluid Mech., 6: 43-100.
- 9- Kunze E. 1987. Limits on growing, finite-length fingers: A Richardson number constraint. J. Mar. Res., 45:533-556.

- 10- Kunze E. 1995. Quantifying salt-fingering fluxes in the ocean." Double-diffusive convection. A. Brandt and J. Fernando, eds., AGU Geophysical Monograph, 94:313-320
- 11- Maxworthy T. 1983. The dynamics of double diffusive gravity currents. J. Fluid Mech., 128:259-282.
- 12- Turner J.S. 1967. Salt fingers a density interface. Deep-sea Res. Oceanogr. Abstr., 14: 599-611.
- 13- Turner J.S. 1998. Stratification and circulation produced by heating and evaporation on a shelf. J.Mar. Res., 56:855-904.



### **Evaluation of Effective Parameters on Buoyant Jets Development**

## in the Stagnant Ambient Fluid

#### J. Ahadiyan<sup>1</sup>\* - S. Musavi Jahromi<sup>2</sup>

#### Abstract

In the present article, effective parameters of the buoyant jets have been evaluated in the stagnant ambient fluid. The jet parameters, geometry parameters and environmental parameters are investigated. Using dimensional analysis, a set of dimensionless functions was obtained. To achieve the exact functions, a physical model was built in the hydraulic laboratory of Shahid Chamran University, Iran (SCU). 215 experiments were set on base of different jet diameter, different concentration of jet injection and different convergence angle of jets. To precede the goals of the present study, the positive mixing length and trajectory characteristics from a buoyant jet and the maximum length of upper and inferior limits of trajectory have been considered. The velocity profiles of adjacent sections near and far field of location jet injection was measured using profiler acoustic, UVDP. The velocity profiles were compared with the theoretical normal Gaussian distribution. Finding shows that the gathered data in this field have been satisfactory correlated. In addition the concentration and dilution in the different sections along the jet flow were measured. Findings show there are satisfactory correlation between experimental data and theoretical formula. The lengths of falling jet trajectory were analyzed as the ratio of trajectory length to port diameter (x/dp) versus relative trajectory elevation  $((Z_0-Zu)/x)$ . According to the results, increasing on concentration of jet flow causing a density gradient between jets and receiving fluid and change in the buoyancy forces involved, has major influence on the lengths of falling trajectory. Findings show there is a nonlinear correlation between the trajectory characteristics and jet flow properties. As change of contraction angle, from 15 to 90 degrees, upper limit of trajectory increased to 25 percents. While contraction angle increase from 15 to 90 degrees, the inferior limit increase to 28 percents.

Key words: Buoyant jet, Contraction angle, Trajectory, Flow pattern, Spreading Coefficient

<sup>1-</sup>PhD Student and Associate prof., Shahid Chamran University, Respectively

<sup>(\*-</sup> Corresponding author Email: Ja\_ahadiyan@yahoo.com)