

بررسی شرایط تخلیه جت دایره‌ای همسو در منابع آب پذیرنده بی‌نهایت کم عمق

بهشاد مرداسی و جواد احدیان^{۱*}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱/۲۹)

چکیده

تخلیه جریان آلاینده در محیط پذیرنده تأثیرات منفی زیست محیطی را به همراه دارد. شرایط محیط پذیرنده بی‌نهایت کم عمق تأثیر به‌سزایی بر پخشیدگی جریان آلاینده خواهد داشت. برای دستیابی به تأثیر شرایط هیدرولیکی، هندسی و محیطی جریان آلاینده در محیط پذیرنده، یک مدل آزمایشگاهی تخلیه کننده سطحی برپا شد. مدل متشکل از فلومی به طول ۳/۲ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۹ متر ساخته شد. بر این اساس با در نظر گرفتن سه تخلیه کننده منفرد ساده به قطرهای ۱/۲، ۱/۶ و ۲/۲ سانتی‌متر، جریان غلیظ با غلظت‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ گرم در لیتر در یک محیط پذیرنده با شرایط H/d برابر با ۲ (بی‌نهایت کم عمق) برنامه‌ریزی آزمایش‌ها صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که طول پایدار با افزایش غلظت به شدت کاهش می‌یابد به طوری که برای افزایش سه برابری غلظت از ۲۰ به ۶۰ گرم بر لیتر این طول از ۲۵ به ۱۰ کاهش می‌یابد. از طرفی براساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که اثر تغییرات پارامتر لزجت در طول نسبی طی شده در همه غلظت‌ها این پارامتر تا مقدار ۱۰۰ زیاد بوده و سپس به مقدار ثابتی میل می‌کند. همچنین اثر تغییرات پارامتر کشش سطحی در طول نسبی طی شده نیز مورد بررسی واقع شد و یافته‌های آن نشان داد که این پارامتر در محیط پذیرنده بی‌نهایت کم عمق همواره در کلیه مراحل تخلیه از ابتدای محل نازل تا انتهای پیشروی مؤثر است. نکته مهم این که این موضوع در تمامی غلظت‌ها با یک شیب وجود داشته و در همه غلظت‌ها اثرگذاری پارامتر کشش سطحی بر پخشیدگی جریان با یک روند مشخص صورت می‌پذیرد. در واقع در تمامی غلظت‌ها پس از طول ناحیه پایدار و استهلاک انرژی ناحیه جت مقدار پارامتر کشش سطحی به ۵ می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: جت سطحی دایره‌ای، پخشیدگی، بی‌نهایت کم عمق، تغییرات غلظت

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: ja_ahadiyan@yahoo.com

مقدمه

پارامترهایی هستند که مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، روبرت و همکاران (۱۳). زیتون و همکاران (۱۴) آزمایش‌هایی را در مورد جت‌های مورب با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به افق و در منبع پذیرنده ساکن انجام داده‌اند. براساس مقدار حداکثر صعود تراژکتوری جت، نتیجه گرفته‌اند که زاویه ۶۰ درجه باعث بیشترین رقیق‌سازی می‌شود. مطالعات تفصیلی ژانگ و بادور (۱۵) در مورد جت شناور عمودی، نشان می‌دهد که رقیق‌سازی در بالاترین سطح صعود جت، در شرایط، مستقل از عدد فرود چگال می‌باشد. سیویلینا و همکاران (۸) تحقیقات آزمایشگاهی خود را در زمینه بررسی خصوصیات هندسی جت‌های مایل (زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) در منبع پذیرنده دارای جریان انجام داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تمامی خصوصیات هندسی جت به عدد فرود چگال مرتبط بوده است. هولی و جریکا، (۱۱) به منظور بررسی تأثیر مرزهای ثابت محیط پذیرنده بر رفتار جریان، نحوه تأثیر عمق محیط پذیرنده در ایجاد ناپایداری و تغییر شکل جریان‌های شناور در آب‌های ساکن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که عدد فرود چگال بیشترین تأثیر را در اختلاط جریان داشته است. در ارتباط با تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین نیز عابسی و همکاران در سال (۵) مطالعات زیادی را بر روی تخلیه سطحی فاضلاب‌های سنگین از کانال مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند که به این نتیجه منجر شد که به دلیل سطح آزاد محیط، مسیر حرکت جریان دارای پیش‌روی افقی بیشتری نسبت به تخلیه‌های مستغرق می‌باشد از طرفی شیب تغییرات عرضی و ترقیق جریان نیز با حالت مستغرق متفاوت بوده و همچنین رابطه مستقیم مشخصات جریان با عمق محیط و شارهای اولیه جریان خروجی و نیز تخلیه جریان چگال سطحی، حداکثر رقت را در پایان منطقه اختلاط اولیه، حدود ۵۰-۴۰ درصد بالاتر از نقطه برخورد دارد. آنها بعد از مقایسه نتایج بی‌بعد به دست آمده از نمودارها، به نتایجی مشابه با جت مستغرق با شناوری مثبت رسیدند. رایج‌ترین روش تخلیه پساب‌های شور، به‌ویژه برای کارخانه‌جات و پروژه‌های

آب‌های سطحی به‌عنوان مهم‌ترین منشاء حیات در کره زمین می‌باشند. این منبع عظیم آب با تعدیل درجه حرارت هوا، گردش آب و تأثیرات اقلیمی بزرگ مقیاس، نقش مهمی در حمایت از حیات در سطح کره زمین بر عهده دارند. دریاها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و تالاب‌ها از نظر تأمین آب شرب، غذا، مکانی برای حیات وحش و همچنین از نظر توریستی اهمیت دو چندان دارند. در مباحث زیست محیطی، منابع آبی همواره با خطر وارد شدن پساب‌ها و زهاب‌های غلیظ روبه‌رو هستند. بنابراین توانایی پیش‌بینی چگونگی توزیع غلظت در منبع پذیرنده به‌خصوص در حوالی و حواشی محل وارد شدن زهاب، در دبی و غلظت‌های بالا بسیار مهم می‌باشد. با توجه به نیاز کشور به کارخانه‌های شوری‌زدا از آب دریا، صنایع ساحلی و همچنین شرایط زیست محیطی برای تخلیه زهاب و استفاده از جت‌های مستغرق راهکاری مناسب به نظر می‌رسد (۱). همچنین پیش‌بینی مقدار رقیق‌سازی پساب شور دفعی در دریاچه‌ها و تالاب‌ها را می‌توان از مهم‌ترین نیازهای حال حاضر کشور نام برد. برای افزایش راندمان اختلاط می‌توان از انواع جت‌ها استفاده نمود. جریان جت و پلوم از نظر ظاهری تقریباً مشابه هستند اما مکانیزم‌های حاکم بر آنها متفاوت است، البرستون (۸). اختلاط جریان جت توسط جریان‌های گردابه‌ای اتفاق می‌افتد. درحالی‌که عامل اختلاط در پلوم نیروهای شناوری داخل جریان می‌باشد. جریان جت‌های متلاطم و پلوم‌ها نوعی از جریانات آشفته هستند که براساس نیروهای مومنتم و شناوری ارزیابی می‌شوند. جریان جت معمولاً توسط یک منبع مداوم و تحت تأثیر نیروهای مومنتم انتشار می‌یابد، محمدی (۴). در این زمینه مطالعات زیادی انجام شده است. محققان متعددی در مطالعات گسترده خود بر روی تخلیه مستغرق فاضلاب‌های سنگین، جنبه‌های متفاوت حاکم بر رفتار این جریان‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. پروفیل غلظت جریان حداکثر ارتفاع خیزش، مسیر حرکت جریان در زوایای مختلف تخلیه و میزان رقیق‌شدگی جریان در طول مسیر از جمله

و آب بی‌نهایت کم عمق تعریف شده است. نسبت عمق به قطر جت در محیط عمیق بزرگ‌تر از ۲۰ است. در محیط آب کم عمق این نسبت بین ۶ تا ۲۰ و در محیط خیلی کم عمق بین ۲ تا ۶ است. طبق تحقیقات کراوا و چمپین آب بی‌نهایت کم عمق محیطی است که نسبت عمق به قطر جت کمتر و یا مساوی ۲ باشد. با توجه به پژوهش‌هایی که ذکر گردید، بررسی جت سطحی منفرد و متلاطم تحت شرایط هندسی و هیدرولیکی متفاوت در زمینه پخشیدگی و طول پیش‌رونده هسته جت به واسطه اختلاف غلظت بین سیال جت و سیال پذیرنده در جریان جت سطحی در محیط بی‌نهایت کم عمق است، لذا با توجه به اهمیت موضوع و تحقق این اهداف، در پژوهش حاضر به بررسی اثر محیط پذیرنده بی‌نهایت کم عمق بر روی خصوصیات جت سطحی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

با توجه به اینکه مطالعه حاضر، مطالعه تئوری آزمایشگاهی می‌باشد، در این قسمت به بررسی پارامترهای وابسته مطالعه حاضر، مراحل ساخت مدل فیزیکی، تحلیل ابعادی، وسایل و دستگاه‌های اندازه‌گیری و برنامه آزمایش‌ها پرداخته شده است.

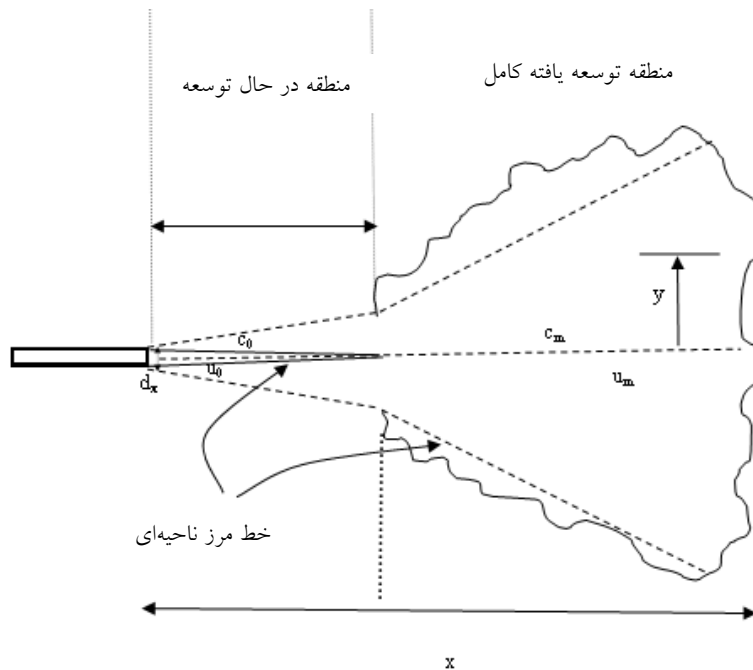
تحلیل ابعادی

با توجه به موقعیت قرارگرفتن نازل جت که روی سطح محیط پذیرنده است، پارامترهای حاکم بر پدیده تخلیه جریان جت سطحی، به منظور دستیابی به روابط بدون بعد حاکم، به شرح زیر است. پارامترهای مؤثر در حرکت سیال جت عبارتند از:

$$f(\rho_a, \rho_j, \sigma, \mu_j, u_0, u_m, d, g, H, y, x, C_m, C_0) = 0 \quad [1]$$

در معادله (۱)، ρ_a : جرم حجمی سیال پیرامون، ρ_j : جرم حجمی سیال جت، σ : کشش سطحی آب، μ_j : لزجت مطلق اولیه سیال جت، u_0 : سرعت اولیه ورودی جت، u_m : سرعت پیش‌روی جت روی خط مرکزی، d : قطر جت، g : شتاب ثقل، H : عمق آب محیط پذیرنده، (x, y) : مختصات مرزهای پیش‌رونده فلاکس جت، C_m : غلظت خط مرکزی در مکان‌های مختلف از محل

کوچک، تخلیه توسط انواع تخلیه‌کننده‌ها و کانال‌های ساحلی در منابع آب پذیرنده می‌باشد. این روش باعث اختلاط اولیه بسیار کمی می‌شود. همچنین منجر به افزایش غلظت در محدوده تخلیه پساب، مخصوصاً به علت نیروی شناوری معکوس، در لایه‌های پائینی منع پذیرنده می‌شود، (۱۰). ژانگ و ژو با تزریق مخلوط آب و هوا از طریق یک نازل به بررسی تراژکتوری جت جوشان در جریان‌های متقاطع پرداخته‌اند. آنها خط مرکزی تراژکتوری را برای هردو فاز آب و هوا در جت جوشان مورد تحلیل قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بعد از جدایی سیال از تخلیه‌کننده، خط مرکزی فاز هوا می‌تواند به صورت مستقیم حرکت کند و جریان جت بعد از طی کردن مسیر افقی و مستقیمی، منحنی تراژکتوری را ایجاد کرده و به پایین سقوط می‌کند (۱۶). در مطالعات آزمایشگاهی سجادی واحیدیان در محیط کم عمق مشخص شد در یک عمق نسبی ثابت با افزایش عدد فرود چگال مقدار ضریب انتشار کاهش می‌یابد. برای یک عدد فرود چگال ثابت، به‌طور متوسط با افزایش عمق نسبی مقدار ضریب انتشار افزایش می‌یابد. اولیور و همکاران (۱۲) به پیش‌بینی اختلاط در نزدیکی میدان تخلیه آب شیرین‌کن‌ها در محیط‌های ساکن پرداختند. او از مدل انتگرال اصلاح شده برای پیش‌بینی شناوری منفی در نزدیکی میدان تخلیه استفاده کرد. این مدل براساس پروفیل گوسین، در سطح بیرونی این جریان‌ها طراحی شد. از این طریق تأثیر شناوری ناشی از ناپایداری در قسمت داخلی جریان از طریق کاهش شار شناوری جریان اصلی به ثبت رسیده است. عابسی و فیلیپ (۶) به بررسی اختلاط در نزدیکی میدان تخلیه آب شیرین‌کن‌ها در محیط ساکن، برای جت‌های غلیظ مستغرق در آب‌های کم عمق و عمیق پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نقطه برخورد جت به پارامترهای D : قطر نازل، F : عدد فرود چگال و H : عمق محیط بستگی دارد. عمق محیط پذیرنده براساس نظریه کراوا و چمپین (۹) به چهار دسته تقسیم شده است. طبق طبقه‌بندی، هر دسته با توجه به مشخصات جت و محیط پذیرنده، به آب عمیق، آب کم عمق، آب خیلی کم عمق



شکل ۱. نمایش اختلاط جت در محیط پذیرنده بی نهایت کم عمق

لازم به توضیح است که با توجه به اثرگذاری عمق جریان پذیرنده در شرایط بی نهایت کم عمق از پارامتر H به جای d در روابط نهایی استفاده شد. در رابطه (۳) پارامتر اول اثر پذیری نیروهای اینرسی به لزجتی در طول حرکت فلاکس جت، پارامتر دوم اثر پذیری تغییرات نیروهای اینرسی به کشش سطحی در طول مسیر و پارامتر سوم اثر پذیری نیروهای اینرسی به نیروی ثقل مؤثر است. برخی از پارامترهای تعریف شده در این پژوهش در شکل (۱) آورده شده است.

مدل آزمایشگاهی

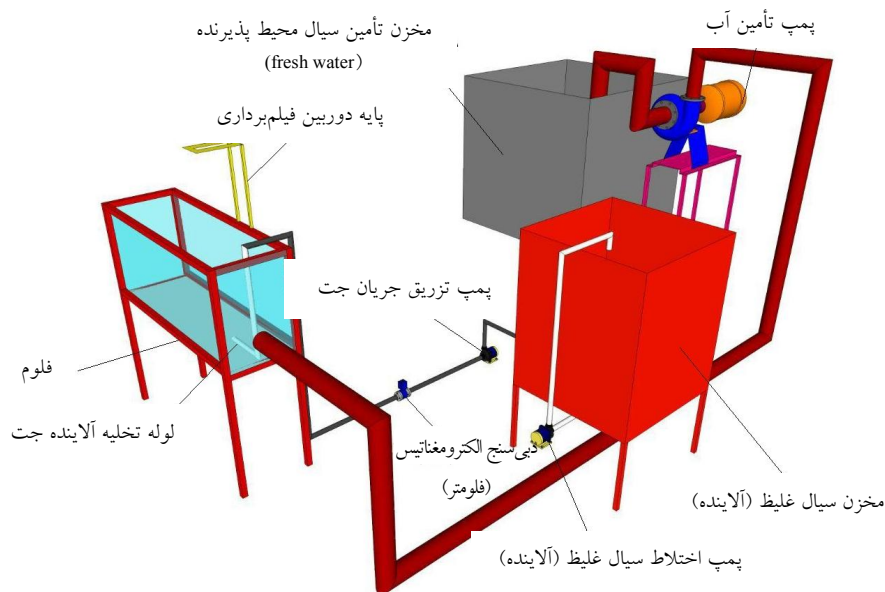
در این پژوهش جهت بررسی تأثیر پارامترهای هندسی، هیدرولیکی بر مشخصات پیشروی جبهه جریان جت، مدل سازی در آزمایشگاه انجام پذیرفت. مدل متشکل از فلوم آزمایشگاهی با دیواره شفاف و از جنس پلکسی گلاس در ابعاد طولی $3/2$ متر، عرضی $0/6$ متر و ارتفاعی $0/9$ متر می باشد. بخش های مختلف این مدل فیزیکی شامل مخزن تأمین آب و پمپ انتقال آب به فلوم، مخزن تزریق جت و پمپ اختلاط سیال جت، فلوم و پمپ تزریق جت، لوله انتقال سیال از مخزن

نازل، C_0 : غلظت اولیه سیال جت می باشد. براساس تحلیل ابعادی پارامترهای بدون بعد به شرح زیر است :

$$f\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_a}, \frac{u_0}{\sigma}, \frac{H\rho_j}{\mu_j}, \frac{u_0 d\rho_j}{\sigma}, \frac{u_m H\Delta\rho}{\mu}, \frac{u_m H\Delta\rho}{\mu}, \frac{u_0}{\sqrt{g'd}}, \frac{c_m}{c_0}, \frac{u_m}{u_0}, \frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) = 0 \quad [2]$$

در معادله (۲) به ترتیب از چپ به راست عبارتند از: دانسیته نسبی بین سیال جت و سیال پذیرنده، عددکشش سطحی اولیه، عدد رینولدز ورودی، عدد کشش سطحی در طول، عدد نیروی اینرسی جریان جت به پارامتر لزجت، عدد فرود چگال، غلظت خط مرکزی در نقطه های مختلف به غلظت اولیه سیال جت، نسبت سرعت جبهه روی خط مرکزی به سرعت دهانه جت، نسبت طول طی شده به قطر جت و نسبت عرض به قطر جت می باشد. با توجه به اینکه تعدادی از پارامترها ثابت هستند و از طرفی در کلیه برنامه ریزی های آزمایش ها $\frac{H}{d}$ ثابت و برابر ۲ در نظر گرفته شده است. با ترکیب روابط می توان رابطه نهایی بدون بعد را به صورت زیر نمایش داد:

$$f\left(\frac{u_m H\Delta\rho}{\mu}, \frac{u_m H\Delta\rho}{\sigma}, \frac{u_m}{\sqrt{g'd}}, \frac{c_m}{c_0}, \frac{u_m}{u_0}, \frac{x}{H}, \frac{y}{H}\right) = 0 \quad [3]$$



شکل ۲. نمائی شماتیک از فلوم آزمایش‌ها به همراه مخزن ذخیره و سیستم جت

اندازه‌گیری شد. کل مدت زمان آزمایش به وسیله دوربین دیجیتال CANOON-G31 با کیفیت سی فرم بر ثانیه فیلم برداری و ذخیره شد. از طرفی ارتباط بین شوری و دانسیته تغییرات، دانسیته سیال تزریق شونده در طول فلوم ثبت و اندازه‌گیری شد. برنامه ریزی آزمایش‌ها به گونه ای بود که هر آزمایش با یکبار تکرار انجام پذیرد. آزمایش اول برای بررسی روند افزایش غلظت و تکرار همان آزمایش برای تعیین غلظت خط مرکزی انجام شد. این کار در تمامی آزمایش‌ها تکرار شد. شکل (۲) نمائی شماتیک از فلوم آزمایش‌ها به همراه مخزن ذخیره و سیستم جت در محیط بی‌نهایت کم عمق را نمایش می‌دهد. شکل (۳) نمائی واقعی از فلوم آزمایش‌ها را به تصویر کشیده است. مطابق با شکل‌های (۲) و (۳) ابتدا فلوم آزمایش‌ها از مخزن ذخیره آب شرب تا ارتفاع مد نظر بر اساس معیار عمق بی‌نهایت کم عمق پر می‌شد. پس از ساکن و آرام شدن آب موجود در فلوم پمپ مربوط به تزریق جریان جت آلاینده وارد مدار می‌شد و سیال آلاینده را به فلوم تزریق می‌نمود. لازم به توضیح است که پمپ مربوط به اختلاط مخزن سیال آلاینده همواره وارد مدار بود؛ بنابراین سیال تزریق شونده همگنی برخوردار بود. پس از تزریق و پخشیدگی سیال آلاینده داده‌های

تزریق به جت، خروجی فلوم و تجهیزات مربوطه و نازل‌های تزریق جت می‌باشد. جهت اندازه‌گیری دبی خروجی از مخزن سیال جت، یک فلومتر الکترومغناطیس با دقت ۰/۲ درصد، بعد از خروجی مخزن تزریق شونده با شرایط استاندارد مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش سیال فلوم اصلی، آب شرب شهری و سیال تزریق شونده به آن، سیالی با چگالی بالاتر (سیال آب-نمک) بود که یک پمپ جداگانه متصل به مخزن تزریق، وظیفه اختلاط و چرخش سیال مخزن تزریق را برعهده داشت. اختلاف چگالی در دو سیال و همچنین نیروی اعمال شده به سیال تزریق شونده توسط پمپ تزریق سبب پخشیدگی جریان جت می‌شود. برای مشاهده پخشیدگی و طول پیش‌روی هسته جت از ماده رنگی پرمنگنات پتاسیم استفاده گردید. در راستای اهداف تحقیق، فلوم آزمایش‌ها امکان برداشت مختصات جریان خروجی جت را دارا بود. از یک دستگاه EC متر دقیق دیجیتالی پرتابل WTW-3310 با دقت ۰/۰۱ درصد میکروزیمنس بر سانتی‌متر که دارای سنسور اندازه‌گیری دما نیز بود، برای اندازه‌گیری EC و دما استفاده شد. مقدار EC و دمای لحظه‌ای آب نمک مخزن تزریق و آب فلوم اندازه‌گیری شد. غلظت‌ها روی صفحه مش‌بندی شده در سه قطر و نه دبی



شکل ۳. الف) نمونه‌ای از اجرای آزمایش‌ها و ب) فلوم و برخی از تجهیزات آزمایشگاهی

طولی است. برای نیل به اهداف تحقیق حاضر در هر آزمایش با توجه به تصویربرداری صورت پذیرفته و ترفیق آن با نقاط کنترل در فیلم برداری ابتدا کلید مختصات طولی و عرضی در هر آزمایش برداشت و اندازه‌گیری شد. جدول (۱) برای چند آزمایش مختلف این مختصات را نمایش می‌دهد. جدول (۲) نتایج برخی از پارامترهای اندازه‌گیری شده و محاسبات را در این تحقیق نمایش می‌دهد. نتایج مربوط به تغییرات غلظت خط مرکزی ارائه می‌شود. برای بررسی تغییرات غلظت خط مرکزی ابتدا مقادیر آن در مقابل پارامتر x/H ترسیم گردید. برای کلیه غلظت‌ها این موضوع ترسیم گردید. سری شکل (۴) نتایج مربوط به این تغییرات را نمایش می‌دهد. با توجه به سری شکل (۴) مشاهده می‌شود که روند

مورد نیاز شامل مختصات حدود پخشیدگی در دید از بالا، تغییرات غلظت خط مرکزی با استفاده از برداشت EC و فیلم برداری با شرایط استاندارد از پخشیدگی برداشت شد. از طرفی برای افزایش دقت هر آزمایش دو بار تکرار می‌گردید. جدول (۱) برخی از داده‌های مختصاتی برداشت شده در آزمایش‌های این تحقیق را نمایش می‌دهد.

نتایج و بحث

براساس آنچه که در بخش تحلیل ابعادی بیان شد، نتایج تحقیق حاضر را می‌توان در بخش‌های مختلف ارائه نمود. این بخش‌ها شامل تغییرات غلظت مرکزی، تغییرات بدون بعد سرعت مرکزی و به‌طور کلی پخشیدگی کلی جریان در ناحیه فلاکس

جدول ۱. داده‌های مربوط به مختصات طولی و عرضی ناحیه پخشیدگی جریان

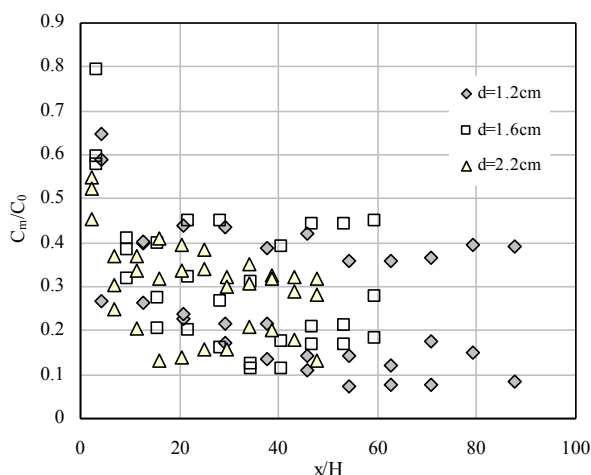
$C_0=20 \text{ g/L}$		$C_0=40 \text{ g/L}$		$C_0=60 \text{ g/L}$							
$d=1/2 \text{ cm}$		$d=1/2 \text{ cm}$		$d=1/2 \text{ cm}$		$d=1/6 \text{ cm}$					
$Q=0/3 \text{ L/s}$		$Q=0/05 \text{ L/s}$		$Q=0/1 \text{ L/s}$		$Q=0/15 \text{ L/s}$		$Q=0/1 \text{ L/s}$		$Q=0/06 \text{ L/s}$	
x/H	y/H	x/H	y/H	x/H	y/H	x/H	y/H	x/H	y/H	x/H	y/H
0/88	0/78	1/51	0/56	2/09	0/62	2/2	0/61	3/34	0/78	0/45	0/76
2/35	3/9	3/87	2/56	4/06	1/75	5/61	1/06	7/65	1/64	2/02	2/32
4/84	6/38	5/68	4/93	5/79	2/53	8/58	1/84	13/4	3/07	4/12	3/43
6/66	8/11	7/84	6/84	9/59	4/19	10/2	2/45	19	4/86	7/88	4/36
9/24	9/77	9/13	9/4	10/9	6/62	12/8	2/8	24/5	6/99	11/9	5/35
14/2	9/68	12/4	10/3	15/8	8/12	15	3/47	31/6	7/57	18	5/1
17/6	8/89	15/8	10/2	22/4	8/29	17/5	4/42	38/5	7/43	21/7	4/3
22/5	8/65	20	8/56	28/4	6/29	20/5	5/77	42/8	6/29	24/6	2/44
26/2	6/56	23/4	7/4	33/7	3/93	25	5/31	44/6	5/35	26/4	1/28
28/6	4/66	26/8	5/59	34/8	1/3	28/6	4/25	46/8	4/5	27/4	0/06

جدول ۲. تغییرات غلظت خط مرکزی در مقابل پارامتر X/H برای غلظت ۴۰، ۲۰ و ۶۰ گرم در لیتر

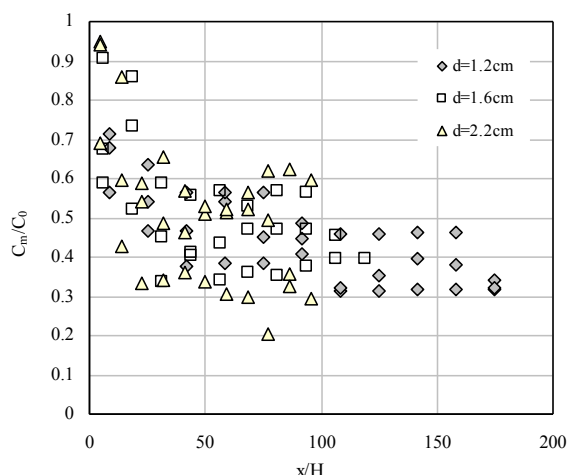
$C_0=20 \text{ g/l}$		$C_0=40 \text{ g/l}$		$C_0=60 \text{ g/l}$		$C_0=20 \text{ g/l}$		$C_0=40 \text{ g/l}$		$C_0=60 \text{ g/l}$	
x/H	C_m/C_0	x/H	C_m/C_0	x/H	C_m/C_0	x/H	C_m/C_0	x/H	C_m/C_0	x/H	C_m/C_0
8/33	0/68	8/33	0/64	8/33	0/43	56/25	0/43	56/25	0/26	56/25	0/27
25	0/63	25	0/40	25	0/25	68/75	0/47	68/75	0/12	68/75	0/28
41/66	0/37	41/66	0/23	41/66	0/17	81/25	0/47	81/25	0/17	81/25	0/28
58/33	0/54	58/33	0/17	58/33	0/14	93/75	0/47	93/75	0/17	93/75	0/29
75	0/45	75	0/13	75	0/14	106/25	0/45	106/25	0/16	106/25	0/29
91/66	0/48	91/66	0/14	91/66	0/14	4/54	0/95	4/54	0/54	4/54	0/54
108/33	0/31	108/33	0/14	108/33	0/14	13/63	0/59	13/63	0/30	13/63	0/52
125	0/31	125	0/12	125	0/19	22/72	0/54	22/72	0/36	22/72	0/46
141/66	0/31	141/66	0/17	141/66	0/19	31/81	0/48	31/81	0/32	31/81	0/36
158/33	0/31	158/33	0/14	158/33	0/21	40/90	0/46	40/90	0/33	40/90	0/44
175	0/31	175	0/08	175	0/21	50	0/51	50	0/34	50	0/42
6/25	0/90	6/25	0/59	6/25	0/76	59/09	0/51	59/09	0/32	59/09	0/32
18/75	0/52	18/75	0/38	18/75	0/55	68/18	0/52	68/18	0/30	68/18	0/26
31/25	0/33	31/25	0/27	31/25	0/29	77/27	0/49	77/27	0/32	77/27	0/27
43/75	0/40	43/75	0/32	43/75	0/30	86/36	0/35	86/36	0/29	86/36	0/23

پایدار گفت می‌شود، روند کاهش با شیب بسیار کمی امتداد می‌یابد. چنین رفتاری در کلیه غلظت‌ها قابل مشاهده است.

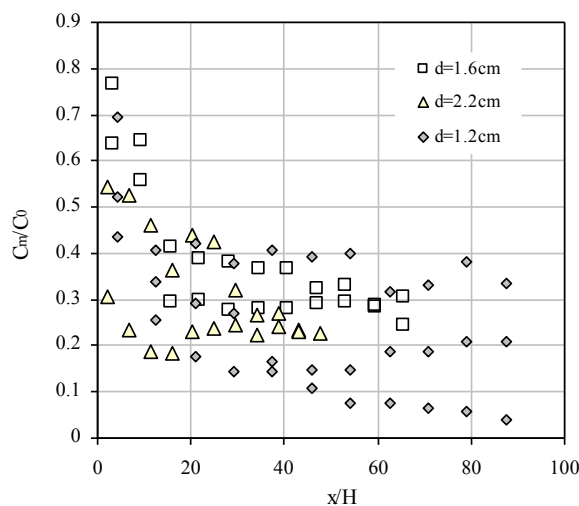
تغییرات غلظت در برابر پارامتر طول، ابتدا با شیب زیاد رو به کاهش گرائیده و پس از آن در یک طول مشخص که به آن طول



(ب)



(الف)

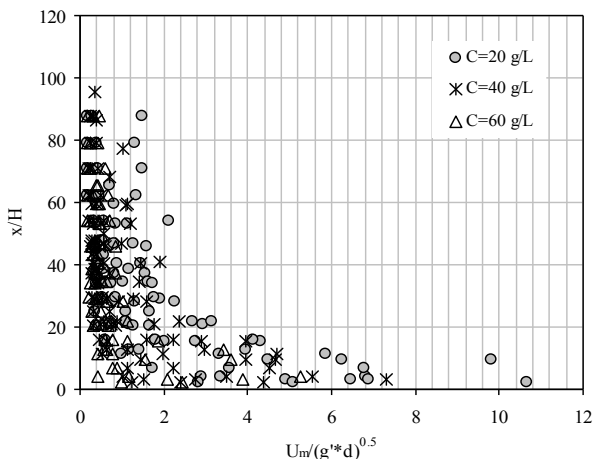


(ج)

شکل ۴. تغییرات غلظت در طول پیش روی جریان غلیظ، (الف) $C_0=20\text{g/L}$ ، (ب) $C_0=40\text{g/L}$ و (ج) $C_0=60\text{g/L}$

تأثیر جت محیط پیرامون تداخل کمتری با فلاکس جت برقرار نموده و روند تغییرات C_m/C_0 از مقدار حداکثر خود یعنی یک شروع شده است. در این شکل مشاهده می شود که بازه تعادلی غلظت برای قطره های مختلف نازل ورودی جریان بین ۰/۳ تا ۰/۶ می باشد. به طور متوسط می توان گفت غلظت خط مرکزی در ناحیه پایدار در همه قطرها برای غلظت ۲۰ گرم در لیتر ۴۶ درصد غلظت اولیه است. این در حالی است که برای غلظت های بالاتر این درصد کاهش می یابد. شکل (۴ ب) تغییرات را برای غلظت ۴۰ گرم در لیتر نمایش می دهد. طول پایدار ۱۵ برابر عمق جریان پذیرنده می باشد و نسبت به غلظت

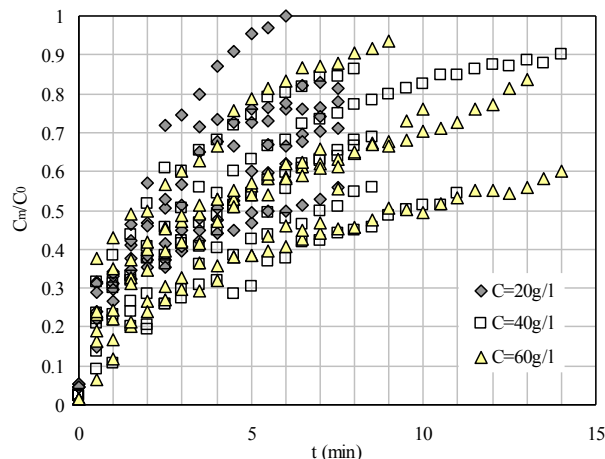
علت این رفتار را می توان به ناحیه تحت تأثیر بین جت و زبری کف به دلیل محیط بی نهایت کم عمق دانست. در واقع اندرکنش بین جریان خروجی جت و محیط پذیرنده بی نهایت کم عمق باعث می شود جریان جت پس از طی یک طول مشخص به روند تغییرات پایدار خود رسیده و جریان پیرامون بر آن اثر نداشته باشد. این بدیهی است که با افزایش عمق جریان در محیط پیرامون شرایط به گونه ای دیگر اتفاق خواهد افتاد. از نظر کمی شکل (۴ الف) نشان می دهد که برای غلظت ۲۰ گرم در لیتر این طول پایدار ۲۵ برابر عمق محیط پذیرنده است. از طرفی به دلیل غلظت کم جریان آلاینده در ناحیه تحت



شکل ۶. پارامتر اینرسی جریان در طول پیشروی فلاکس جریان جت

در طول $x=110\text{ cm}$ نسبت به محل نازل بررسی شده است. لازم به توضیح است که طول در نظر گرفته شده به منظور قرارگیری در ناحیه اختلاط کامل سیال جت با سیال بی‌نهایت کم عمق لحاظ گردیده است. براساس این شکل مشخص است که پس از زمان حدود ۸ دقیقه کلیه غلظت‌ها به میزان ثابتی میل نموده‌اند. در این شکل برای غلظت مشخص هرچه میزان دبی جریان تخلیه شونده بیشتر می‌شود، C_m/C به یک نزدیک‌تر می‌شود. ولی زمان به تعادل رسیدن و ثابت شدن غلظت همان حدود ۸ دقیقه است. در مجموع در غلظت‌های پایین‌تر مقادیر C_m/C بیشتری نسبت به غلظت‌های بالاتر رخ می‌دهد. این موضوع به دلیل اندرکنش جریان آلاینده با محیط پذیرنده بی‌نهایت کم عمق است. بدین معنی که در غلظت‌های پایین‌تر به دلیل اختلاف فاز کمتر هر دو جریان و اختلاط کمتر فلاکس جریان جت با محیط پیرامون مقادیر C_m/C بیشتری حاصل می‌شود. برای بررسی بهتر موضوع تغییرات پارامتر نیروی اینرسی جریان در طول ناحیه پیشروی ترسیم شده است. شکل (۶) تغییرات این پارامتر را برای x/H های مختلف در کلیه آزمایش‌های تحقیق حاضر نمایش می‌دهد.

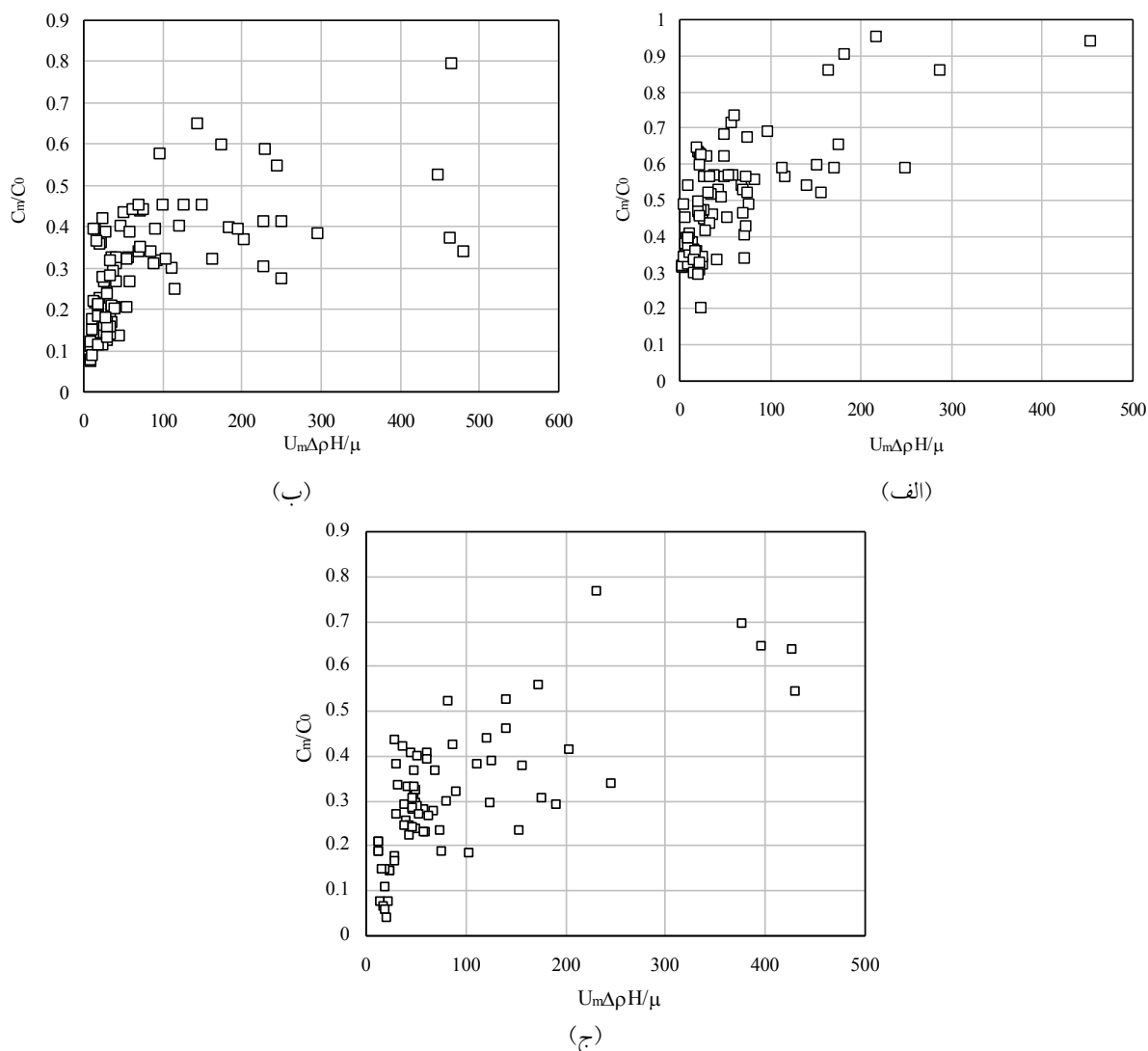
در شکل (۶) x/H برابر صفر در واقع محل نازل جریان جت می‌باشد، که نشان می‌دهد همه آزمایش‌های تحقیق حاضر برای شرایط جریان فوق بحرانی براساس عدد فرود چگال برنامه‌ریزی شده‌اند. حداکثر عدد فرود چگال برابر $10/9$ و



شکل ۵. تغییرات غلظت خط مرکزی نسبت به زمان برای $x=110\text{ cm}$

اولیه 20 گرم در لیتر حدوداً 50 درصد کاهش یافته است. این شکل نشان می‌دهد که بازه تعادلی غلظت برای قطرهای مختلف بین $0/1$ تا $0/4$ می‌باشد و متوسط غلظت خط مرکزی در ناحیه پایدار 30 درصد می‌باشد. طول پایدار در شکل (۴) برای غلظت 60 گرم در لیتر 10 برابر عمق جریان پذیرنده می‌باشد. بازه تعادلی این غلظت همانند غلظت 40 گرم بر لیتر می‌باشد. روند تغییرات C_m/C از مقدار $0/8$ شروع شده و متوسط غلظت خط مرکزی در ناحیه پایدار در این غلظت نسبت به غلظت 20 گرم در لیتر با 40 درصد کاهش همراه بوده است. براساس این شکل می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افزایش غلظت از 20 به 60 گرم در لیتر طول نسبی ناحیه تعادل از 25 به 10 کاهش یافته و این به معنای این است که با افزایش غلظت آلاینده تا 60 درصد طول ناحیه تعادل کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش غلظت به محض ورود جریان آلاینده به محیط پذیرنده بی‌نهایت کم عمق غلظت آلاینده در محل‌های نازل جت سریعاً رو به کاهش گرانیده است. این موضوع به این معنی است که در محل‌های نزدیک جت تغییرات غلظت خط مرکزی برای غلظت‌های بالاتر، بیشتر می‌شود. از طرفی در همین راستا تغییرات غلظت خط مرکزی نسبت به زمان در یک فاصله از محل نازل بررسی گردید. شکل (۵) این موضوع را نمایش می‌دهد.

براساس شکل (۵) روند تغییرات زمانی غلظت خط مرکزی

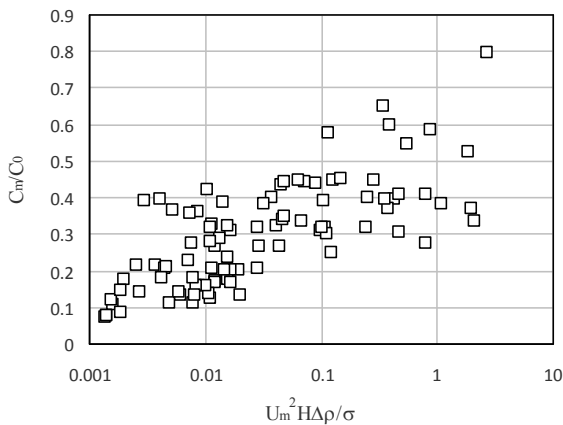


شکل ۷. تغییرات غلظت خط مرکزی نسبت به پارامتر تغییرات اثر لزجت، الف) $C_0=20\text{g/L}$ ، ب) $C_0=40\text{g/L}$ و ج) $C_0=60\text{g/L}$

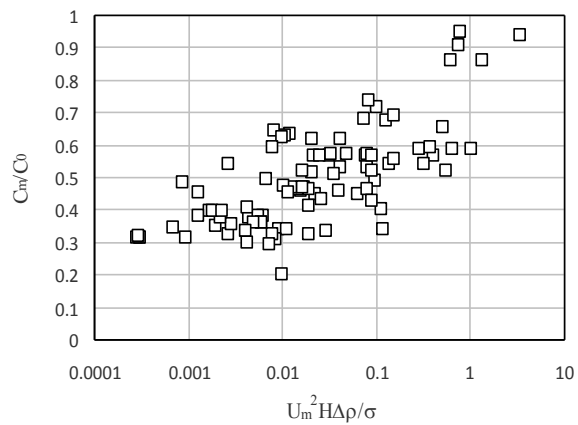
جریان جت از ۵/۵ به ۰/۷ تا x/H برابر با ۲۵ رخ داد و پس از آن تا x/H ۹۰ این مقدار ثابت می ماند. در واقع محیط پذیرنده بی نهایت کم عمق برای تأثیرپذیری سیال تخلیه شونده به صورت جت باعث می شود که طول طی شده x/H حدود ۲۵ را بتوان ناحیه نزدیک جت و پس از آن را ناحیه دور از جت معرفی نمود. در همین راستا تغییرات C_m/C_0 در برابر پارامتر تغییرات اثر لزجت در شکل (۷) ترسیم شده است.

براساس سری شکل (۷) ملاحظه می شود که اثر تغییرات پارامتر لزجت نیز قابل ملاحظه است بدین صورت که در همه غلظت ها اثر این پارامتر تا مقدار حدود ۱۰۰ شدیدتر بوده و

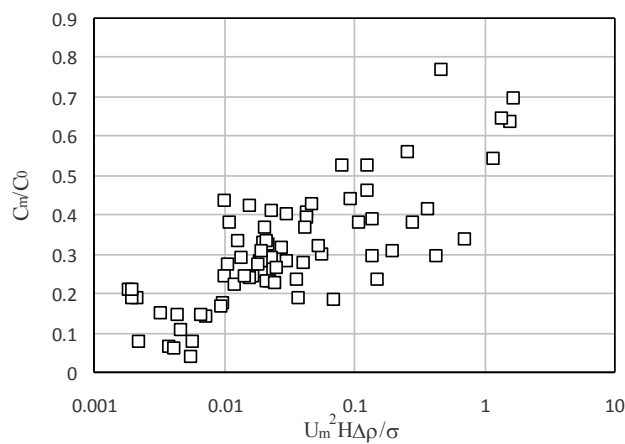
مربوط به آزمایش با غلظت ۲۰ گرم در لیتر است و در غلظت ۴۰ و ۶۰ گرم در لیتر عدد فرود جریان چگال در ابتدای محل تخلیه به ترتیب ۷/۵ و ۵/۵ می باشد. مطابق با این شکل ناحیه نزدیک جت در سیال پذیرنده بی نهایت کم عمق را می توان حداکثر تا x/H برابر با ۲۵ دانست. تا این طول انتقال مومتم و تغییرات نیروی اینرسی سیال تخلیه شونده بسیار شدید بوده به گونه ای که برای مثال در غلظت ۲۰ گرم در لیتر تغییرات پارامتر نیروی اینرسی جریان جت از ۱۰/۹ به حدود ۱/۲ کاهش یافته و پس از آن تا x/H حدود ۹۰ مقدار آن ثابت می ماند. همچنین برای غلظت ۶۰ گرم در لیتر تغییرات پارامتر نیروی اینرسی



(ب)



(الف)



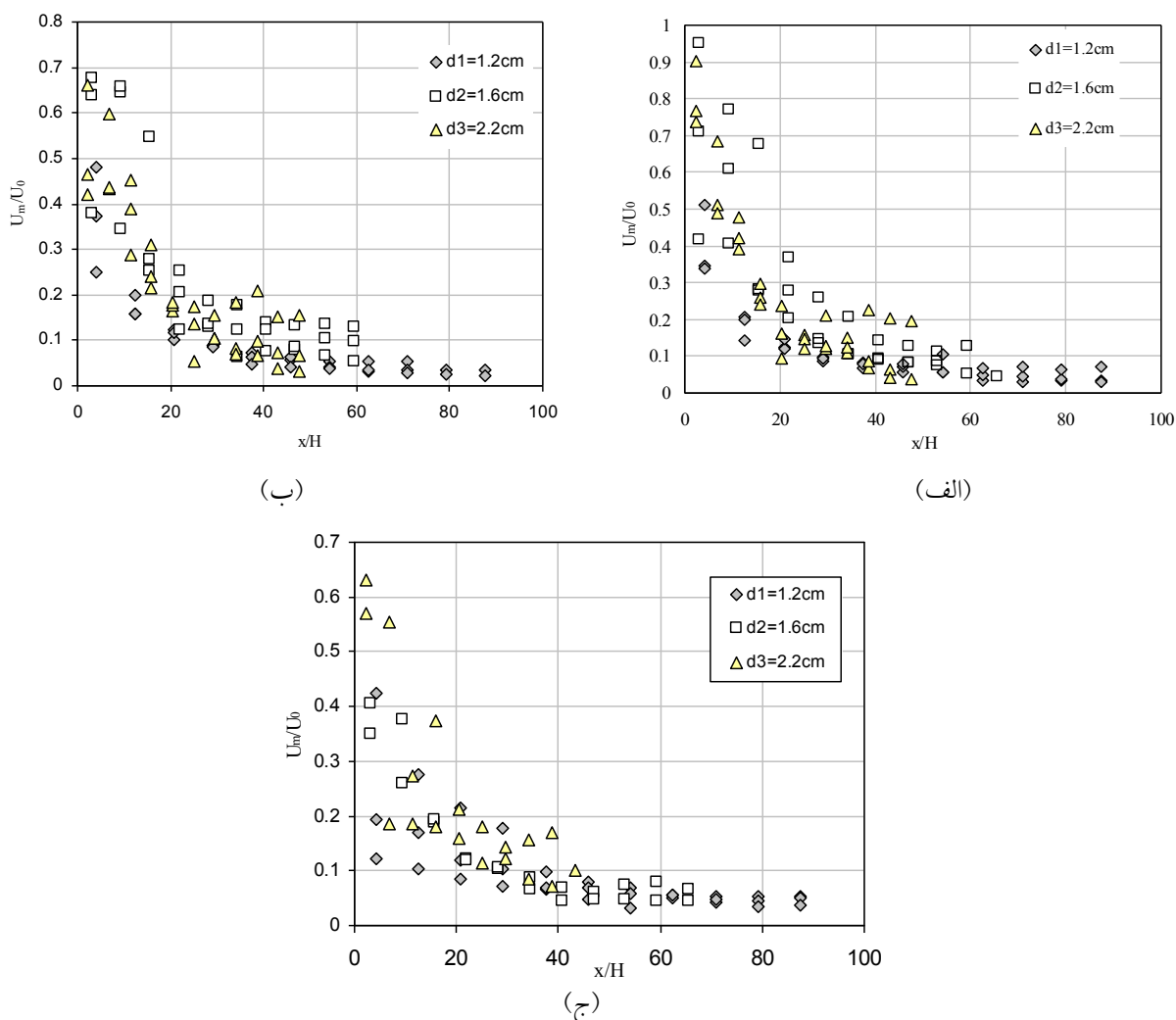
(ج)

شکل ۸ تغییرات غلظت خط مرکزی نسبت به پارامتر تغییرات اثر کشش سطحی، الف) $C_s=20\text{g/L}$ ، ب) $C_s=40\text{g/L}$ و ج) $C_s=60\text{g/L}$

نازل تا انتهای پیشروی وجود دارد. در واقع عمق بی‌نهایت کم محیط پذیرنده در تمامی آزمایش‌ها کاملاً اثرگذار است. نکته مهم‌تر این است که این موضوع در تمامی غلظت‌ها با یک شیب ثابت مشاهده می‌شود. به عبارتی در همه غلظت‌ها اثر گذاری پارامتر کشش سطحی بر پخشیدگی جریان با یک روند ثابتی صورت می‌پذیرد. حداکثر مقدار ملاحظه شده پارامتر کشش سطحی در آزمایش‌های این تحقیق در حدود ۵ می‌باشد که این موضوع صرف نظر از میزان غلظت آلاینده ورودی رخ می‌دهد. در واقع در تمام غلظت‌ها پس از طول ناحیه پایدار و استهلاک انرژی ناحیه جت مقدار پارامتر کشش سطحی به ۵ می‌رسد. ولی بدیهی است که مقدار کمینه آن تابعی از میزان غلظت اولیه ورودی بوده و با افزایش غلظت اولیه حداقل مقدار پارامتر

پس از آن مقدار تغییرات C_m/C_0 به مقدار ثابتی میل می‌کند. معنی فیزیکی این موضوع این است که در بخش‌های ابتدایی محل تخلیه که اثر نیروی ممتن نسبت به نیروی لزجی به دلیل بالا بودن تغییرات غلظت و سرعت بیشتر است. اثر پارامتر لزجت ناچیز بوده و پس از طی طول ناحیه تعادل که در شکل (۴) تشریح شد، به دلیل کاهش اختلاف غلظت و کاهش سرعت اثر پارامتر لزجت بسیار بیشتر می‌شود. در واقع این اثر گذاری باعث پخشیدگی بیشتر جریان تخلیه شونده در طول پس از ناحیه تعادل خواهد شد. در ادامه این موضوع شکل (۸) اثر گذار کشش سطحی را نمایش می‌دهد.

مطابق با سری شکل (۸) مشاهده می‌شود که اثر پارامتر کشش سطحی همواره در کلیه مراحل تخلیه از ابتدای محل

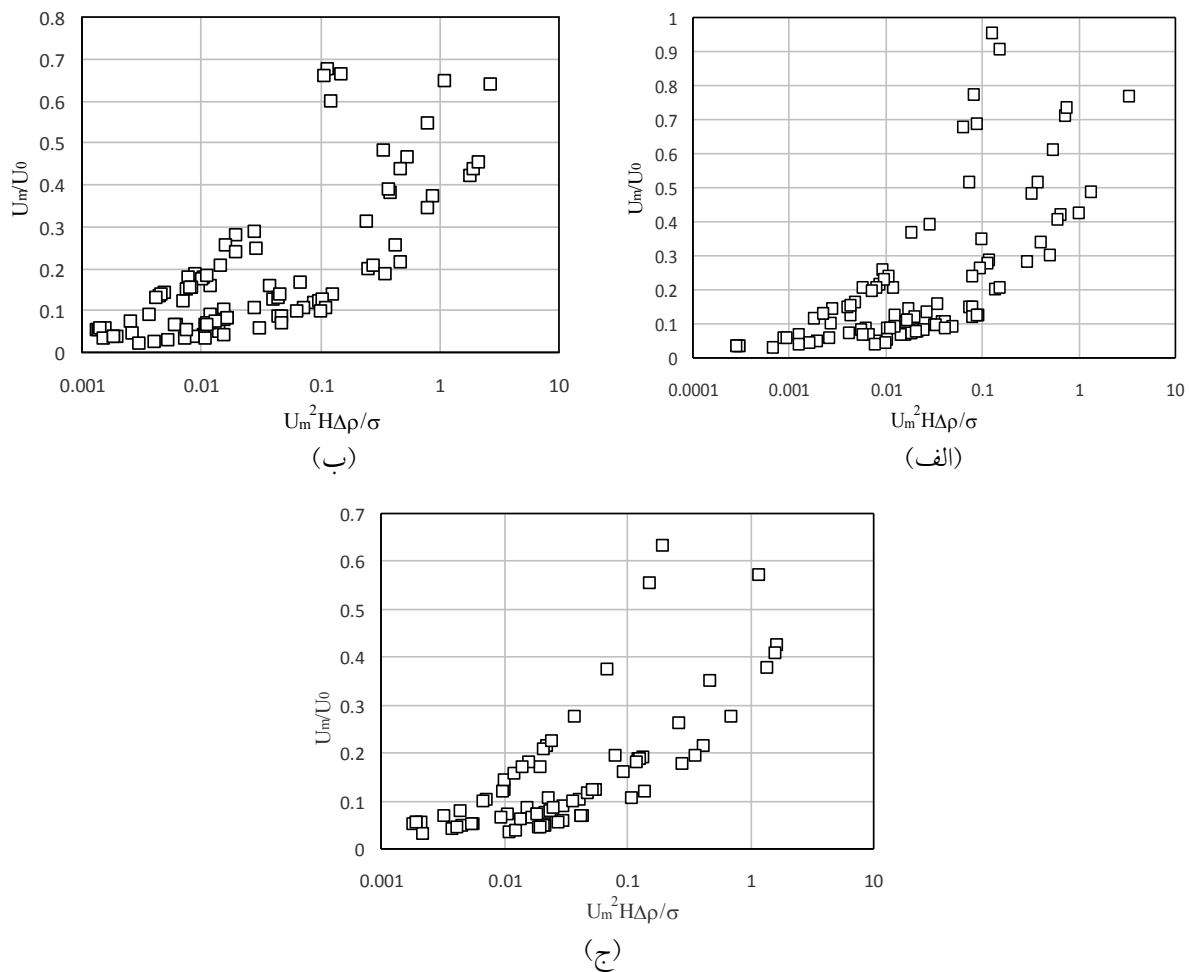


شکل ۹. تغییرات سرعت در طول پیشروی جریان غلیظ، (الف) $C=20\text{g/L}$ ، (ب) $C=40\text{g/L}$ و (ج) $C=60\text{g/L}$

شکل (الف)، (ب) و (ج) شکل (۹) ملاحظه می‌شود که در ناحیه تعادل انرژی جت رو به کاهش گرائید و سرعت انتقال خط مرکزی تقریباً ثابت می‌شود. این در حالی است که تقریباً صرف نظر از میزان غلظت در x/H حدود ۶۰ مقدار U_m/U_0 به کمتر از ۵ درصد مقدار اولیه رسیده و تا انتها این مقدار ثابت می‌ماند. در واقع در محیط پذیرنده بی‌نهایت کم عمق اثر اصطکاک کف، کشش سطحی و لزجت باعث می‌شود که صرف نظر از میزان غلظت اولیه آلاینده با طی شدن طولی، انرژی ناحیه جت به‌طور کلی مستهلک شده و سرعت خط مرکزی به مقدار بسیار زیادی کاهش یافته و با همین سرعت تا حد امکان پیشروی ناحیه غلیظ صورت می‌پذیرد. شکل (۱۰)

کشش سطحی افزایش می‌یابد. در ادامه برای بررسی شرایط ناحیه پیشروی و بررسی خصوصیات و تغییرات نیروی حرکتی ناحیه جت، تغییرات سرعت خط مرکزی به‌عنوان حداکثر سرعت در هر مقطع عرضی از محل نازل جت نسبت به طول نسبی x/H در شکل (۹) ترسیم شده است.

بر اساس سری شکل (۹) همانند تغییرات C_m/C_0 ملاحظه می‌شود که برای غلظت ۲۰ گرم در لیتر سرعت خط مرکزی جریان تا طول $\frac{x}{H} \leq 3$ تقریباً با همان سرعت اولیه نازل ادامه یافته و پس از آن رو به کاهش می‌گراید. این در حالی است که با افزایش غلظت به محض ورود جریان آلاینده به محیط پذیرنده با کاهش سرعت روبه‌رو می‌شود. از طرفی در هر سه



شکل ۱۰. تغییرات سرعت خط مرکزی نسبت به پارامتر کشش سطحی، الف) $C_s = 20 \text{ g/L}$ ، ب) $C_s = 40 \text{ g/L}$ و ج) $C_s = 60 \text{ g/L}$

مقادیر کمتر از ۰/۱ ملاحظه می‌شود که اثر کشش سطحی نسبت به سایر پارامترها شدیدتر شده که در پیش‌روی ناحیه آلاینده نقش به‌سزائی دارد. در واقع مشاهده می‌شود با کاهش پارامتر کشش سطحی از ۰/۱ به مقادیر کمتر از ۰/۰۰۱ و یا کمتر روند تغییرات سرعت خط مرکزی بسیار کمتر شده و در واقع نیروی کشش سطحی در همراهی با حرکت جریان آلاینده و ممانعت از سقوط فاز آلاینده باعث پیش‌رانی بیشتر در محیط پذیرنده می‌گردد. از نظر کمی برای غلظت ۲۰ گرم در لیتر، می‌توان ناحیه اثرگذاری کشش سطحی در پیش‌رانی جریان را برای مقادیر U_m/U_0 کمتر از ۰/۶۵ دانست. این در حالی است که برای غلظت‌های ۴۰ و ۶۰ گرم در لیتر ناحیه اثرگذاری کشش سطحی در پیش‌رانی جریان به‌ترتیب برای مقادیر U_m/U_0

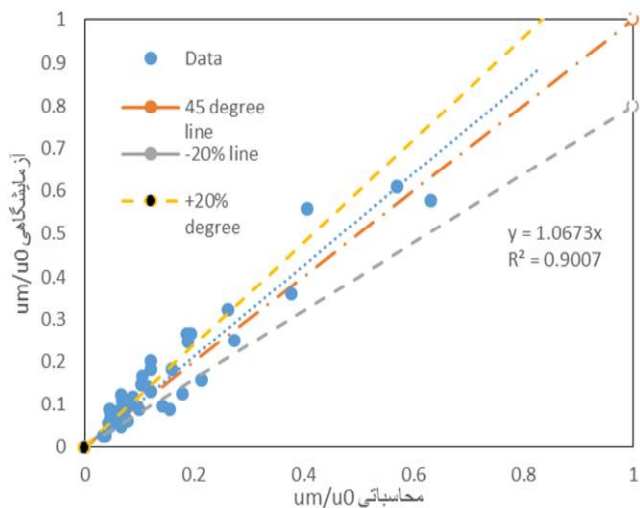
اثر پارامتر کشش سطحی را بر تغییرات سرعت خط مرکزی نمایش می‌دهد.

براساس شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود که پارامتر کشش سطحی بر روند تغییرات سرعت به چه صورتی تأثیرگذار است. تقریباً در هر سه شکل (الف) الی (ج) می‌توان نتیجه‌گیری نمود که در پارامتر کشش سطحی بزرگ‌تر از ۰/۱ تغییرات سرعت شدیدتر بوده و این موضوع به اثرگذاری اصطکاک جریان پیرامون با ناحیه جت برمی‌گردد. در واقع در پارامتر کشش سطحی بزرگ‌تر از ۰/۱ که مربوط به نواحی نزدیک ناحیه نازل جت می‌باشد، انرژی مومنتی جریان رو به کاهش گرانیده و مشاهده می‌شود از مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۱ تا خود ۰/۱ تغییرات سرعت خط مرکزی شدیدتر است. ولی از

محاسباتی که در استخراج رابطه (۶) نقشی نداشتند استخراج گردیده است. ضریب رگرسیون نیز در این حالت نمایه‌ای از میزان دقت هر یک از مدل‌های آماری خواهد بود. مقدار ضریب رگرسیون در این حالت برابر با ۹۰ درصد به دست آمده که نشان از دقت مناسب مدل آماری است. مدل آماری خطی با دقت قابل قبولی قابل به پیش‌بینی پارامترهای مهم در حرکت جت سطحی چگال بوده و همان‌طوری که مشاهده می‌شود، اکثر داده‌های محاسباتی در مقابل مقادیر پیش‌بینی بر روی خط ۴۵ درجه واقع شده‌اند.

مقایسه با تحقیقات گذشته

در این بخش به مقایسه پژوهش‌های اخیر با پژوهش حاضر پرداخته شده است. مشخصات هندسی، هیدرولیکی و محیطی جت در محیط پذیرنده متفاوت، شرایط پخشیدگی و طول پیش‌روی جریان آلاینده را متفاوت می‌سازد. در شکل ۱۲ سلمان‌زاده و احدیان (۱) به بررسی طول پیش‌روی و اختلاط جریان آلاینده در محیط عمیق پرداختند. در نتایج به دست آمده، نوع محیط پذیرنده باعث تغییر شرایط مرزی، مسیر حرکتی جریان آلاینده و توسعه جریان شد. از نظر کمی حداکثر توسعه فلاکس جریان در محیط غیر هم‌فاز تا حدود ۲۰۰ برابر قطر نازل می‌باشد که در محیط هم‌فاز چنین جریان تا ۴۰۰ برابر قطر نازل روی وی دهد. سجادی‌فر و احدیان (۲) مطالعاتی را بر روی طول پخشیدگی جریان آلاینده در محیط پذیرنده کم عمق انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که در غلظت‌های متفاوت به‌طور متوسط با دو برابر شدن عمق محیط پذیرنده طول پیش‌رونده هسته جت به ترتیب ۳۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با سه برابر شدن عمق محیط پذیرنده، به‌طور متوسط طول پیش‌رونده هسته جت ۶۲ درصد افزایش یافته است. عابسی و همکاران (۳) به بررسی آزمایشگاهی سرعت پیش‌روی جریان در جت سطحی مستطیلی همگرا بدون شیب طولی پرداختند. در این راستا تأثیر متغیرهای هندسی و هیدرولیکی بر سرعت پیش‌روی جریان مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج



شکل ۱۱. تغییرات سرعت

کمتر از ۴/۰ و ۳۵/۰ رخ می‌دهد. با توجه به بررسی‌های صورت پذیرفته و اثرگذاری پارامترهای مختلف بر میزان پخشیدگی ناحیه جت شامل U_m/U_0 اقدام به استخراج رابطه آماری براساس ۸۰ درصد داده‌ها گردید. روابط (۴) و (۵) این موضوع را نمایش می‌دهد. برای مشخص نمودن رابطه ریاضی بین پارامترها از نرم‌افزار آماری SPSS بهره گرفته شد. به گونه‌ای که روش‌های مختلف خطی و غیر خطی مورد آزمون آماری با پارامترهای وابسته قرار گرفت و نهایتاً مدل غیر خطی زیر برای پارامترها استخراج شد.

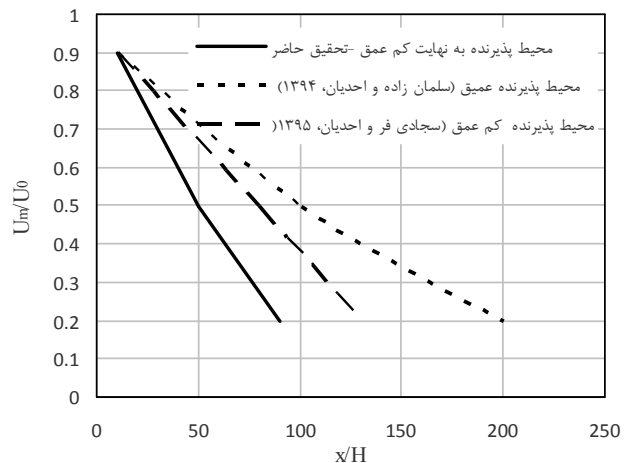
$$\frac{U_m}{U_0} = f\left(\frac{C_m}{C_0}, \frac{X}{H}, Fr_j\right) \quad [4]$$

$$\frac{U_m}{U_0} = -0.27\left(\frac{C_m}{C_0}\right) + \left(\frac{X}{H}\right)^{-0.291} + (Fr_j)^{0.48} - 1/125 \quad [5]$$

مدل‌های آماری براساس ۸۰ درصد داده‌ها استخراج گردید و ۲۰ درصد داده‌ها جهت برآورد دقت و صحت‌سنجی روابط مورد استفاده قرار گرفتند. از طرفی در این تحقیق با استفاده از مدل‌های آماری بسط داده شده برای هر آزمایش مقادیر U_m/U_0 محاسبه و در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده متناظر آنها ترسیم گردید.

شکل (۱۰) تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت در مقابل محاسباتی آن با استفاده از رابطه (۶) را نمایش می‌دهد. شکل (۱۰) براساس ۲۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده و

پایدار در غلظت ۴۰ و ۶۰ گرم بر لیتر به ترتیب برابر با ۱۵ و ۱۰ برابر قطر نازل آلاینده می‌باشد. همچنین بازه تعادلی غلظت برای هر دو غلظت اولیه یاد شده بین ۰/۱ تا ۰/۴ می‌باشد. نتایج نشان داد که در طولی پس از طول پایدار تغییرات زمانی غلظت در محیط پذیرنده بی‌نهایت کم عمق به گونه‌ای است که پس از طی مدت زمان حدود ۸ دقیقه غلظت به مقادیر حدود غلظت اولیه می‌رسد. از طرفی اثر تغییرات پارامتر لزجت در طول نسبی طی شده بدین صورت است که در همه غلظت‌ها اثر این پارامتر تا مقدار حدود ۱۰۰ زیاد بوده و پس از آن تقریباً بی‌اثر می‌شود. از طرفی نتایج نشان داد که اثر پارامتر کشش سطحی همواره در کلیه مراحل تخلیه از ابتدای محل نازل تا انتهای پیشروی وجود دارد. این موضوع به این معنی است که در همه غلظت‌ها اثرگذاری پارامتر کشش سطحی بر پخشیدگی جریان با یک روند ثابتی صورت می‌پذیرد. در واقع در تمام غلظت‌ها پس از طول ناحیه پایدار و استهلاك انرژی ناحیه جت مقدار پارامتر کشش سطحی به ۵ می‌رسد. ولی مقدار حداقل آن تابعی از میزان غلظت اولیه ورودی بوده و با افزایش غلظت اولیه حداقل مقدار پارامتر کشش سطحی افزایش می‌یابد. از طرفی براساس نتایج تغییرات سرعت خط مرکزی در مقادیر پارامتر کشش سطحی بزرگ‌تر از ۰/۱ تغییرات سرعت زیادتر می‌باشد. در مقادیر کمتر از ۰/۱ ملاحظه می‌شود که اثر کشش سطحی نسبت به سایر پارامترها شدیدتر شده که در پیشروی ناحیه آلاینده نقش بسزائی دارد. از نظر کمی در غلظت ۲۰ گرم در لیتر، ناحیه اثرگذاری کشش سطحی در پیشرانی جریان را برای مقادیر U_m/U_0 کمتر از ۰/۶۵ دانست. این در حالی است که برای غلظت‌های ۴۰ و ۶۰ گرم در لیتر ناحیه اثرگذاری کشش سطحی در پیشرانی جریان به ترتیب برای مقادیر U_m/U_0 کمتر از ۰/۴ و ۰/۳۵ رخ می‌دهد. همچنین در تحقیق حاضر از روابط آماری برای برقراری ارتباط تغییرات سرعت و غلظت خط مرکزی استفاده شد.



شکل ۱۲. مقایسه با پژوهش‌های اخیر

به دست آمده، در حالت آزاد و خروجی سطحی در عمق یکسان طول پیش‌رونده بیشتری را نسبت به حالت مستغرق دارند. در پژوهش حاضر طول پیش‌رونده جریان در غلظت‌های مختلف به طور متوسط ۹۰ برابر قطر را طی کرده است. این در حالی است که در غلظت‌های بیشتر طول پیش‌رونده کمتری نسبت به غلظت‌های کمتر است. شکل (۱۰) سرعت پیشروی جریان آلاینده در محیط‌های پذیرنده متفاوت نسبت به طول پیشروی را نمایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

براساس آزمایش‌های انجام شده در خصوص تخلیه جریان جت سطحی در محیط پذیرنده بی‌نهایت کم عمق نتایج مهمی استخراج گردید. برای این منظور ناحیه پخشیدگی جریان آلاینده به صورت مختصاتی برداشت شد و تغییرات غلظت و سرعت خط مرکزی در ناحیه فلاکس طولی مورد بررسی واقع شد. نتایج نشان داد که اندرکنش جریان جت و محیط پذیرنده بی‌نهایت کم عمق باعث می‌شود جریان جت پس از طی یک طول مشخص به روند تغییرات پایدار خود برسد. نتایج نشان داد که در غلظت ۲۰ گرم در لیتر این طول پایدار ۲۵ برابر عمق محیط پذیرنده است. در این غلظت پس از ناحیه تعادلی، غلظت نسبی بین ۰/۳ تا ۰/۶ می‌باشد. این در حالی است که طول

منابع مورد استفاده

۱. سلمانزاده، س. و ج. احدیان. ۱۳۹۵. پراکنش حدی جریان جت خروجی در محیط هم‌فاز و غیر هم‌فاز، مجله علمی کشاورزی، علوم و مهندسی آبیاری ۳۹ (۱): ۹۳-۱۰۷
۲. سجادی‌فر، ر. و ج. احدیان. ۱۳۹۵. طول پیش‌رونده هسته جت سطحی در محیط پذیرنده کم عمق، مجله آب و خاک ۲۰ (۷۵): ۱۴۱-۱۴۹
۳. عابسی، ع.، م. سعیدی، ن. حاجی‌زاده ذاکر و ح. خیرخواه گیلده. ۱۳۹۰. خصوصیات جریان در تخلیه کننده‌های سطحی فاضلاب‌های سنگین در پیکره آبی ساکن و لایه‌بندی نشده. مجله آب و فاضلاب (۴): ۷۱-۸۲
۴. محمدی، ف. ۱۳۹۰. بررسی تأثیر شرایط جت مستغرق در رقیق‌سازی و دفع پساب و زهاب در منابع پذیرنده با استفاده از مدل فیزیکی. پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
5. Abessi, O., M. Saeedi, T. Bleninger and M. Davidson. 2012. Surface discharge of negatively buoyant effluent in unstratified stagnant water. *J. Hydro-Environ. Res.* 6(3): 181-193.
6. Abessi, O. and P. J. Roberts. 2015. Dense jet discharges in shallow water. *J. of Hydraulic Eng.* 142(1): 04015033.
7. Albertson, M. L., Y. B. Dai, R. A. Jensen and H. Rouse. 1950. Diffusion of submerged jets. *Transactions of the American Soc. of Civil Eng.* 115(1): 639-664.
8. Cipollina, A., A. Brucato, F. Grisafi and S. Nicosia. 2005. Bench-scale investigation of inclined dense jets. *J. Hydraulic Eng.* 131(11): 1017-1022.
9. Crow, S. C. and F. H. Champagne. 1971. Orderly structure in jet turbulence. *J. Fluid Mechanics* 48(3): 547-591.
10. Gungor, E. and P. J. Roberts. 2009. Experimental studies on vertical dense jets in a flowing current. *J. Hydraulic Eng.* 135(11): 935-948.
11. Holley, E. R. and G. H. Jirka. 1986. *Mixing in Rivers*. US Army Engineer Waterways Experiment Station.
12. Oliver, C. J., M. J. Davidson and R. I. Nokes. 2013. Predicting the near-field mixing of desalination discharges in a stationary environment. *Desalination* 309: 148-155.
13. Roberts, P. J., A. Ferrier and G. Daviero. 1997. Mixing in inclined dense jets. *J. Hydraulic Eng.* 123(8): 693-699.
14. Zeitoun, M. 1972. *Model Studies of Outfall Systems for Desalination Plants. Part III. Numerical Simulation and Design Considerations*.
15. Zhang, H. and R. E. Baddour. 1998. Maximum penetration of vertical round dense jets at small and large Froude numbers. *J. Hydraulic Eng.* 124(5): 550-553.
16. Zhang, W. and D. Z. Zhu. 2014. Trajectories of Air-Water Bubbly Jets in Crossflows. *J. Hydraulic Eng.* 140(7): 06014011.

Investigating the Discharge Conditions of the Circular Buoyant Co-flow Jet in the Infinitely Shallow Water

B. Mardasi and J. Ahadiyan^{1*}

(Received: Sept. 24-2016; Accepted: April 18-2017)

Abstract

Discharge of contaminants in the acceptor ambient has negative environmental impacts. Extremely shallow acceptor ambient conditions will have a significant impact on the diffusion of the contaminants flow. To achieve the effect of the hydraulic, geometric and environmental conditions of the contaminant flow in the acceptor ambient, an experimental model of surface draining was applied. The model consisted of a flume with 3.2 meters length, 0.6 meters width and 0.9 height. Accordingly, by considering three simple single drainers with the diameters of 1.2, 1.6 and 2.2 centimeters, a dense flow with 20, 40 and 60 g/L concentrations occurred in an acceptor ambient with $H/d = 2$. The results showed that equilibrium length was extremely decreased by increasing the concentrations; this was such that with increasing the concentration three times from 20 to 60 g/L, this length was decreased from 25 to 10. However, based on the results, it was found that the effect of the changes of the viscosity parameter over the relative length was significant, as its effect was high in all concentrations to 100; then it tended to become a constant value. In this regard, the effect of changes in the surface tension parameters over the relative length was investigated; the results showed that this parameter was always effective in the extremely shallow acceptor ambient at all stages from the beginning to the end of the progress. It is important to note that this had a constant slope in all concentrations and surface tension had an effect on flow diffusion with a certain trend in all concentrations. In fact, surface tension in all concentrations reached to 5 after the equilibrium length and jet energy dissipation area.

Keywords: Circular Jet, Diffusion, Infinite shallow water, Density Surrounding.

1. Faculty of Water Sci. Eng., Shahid Chamran Univ. of Ahvaz, Iran.

*: Corresponding Author, Email: ja_ahadiyan@yahoo.com