

## بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه جت‌های روزنه‌ای مستغرق بر الگوی آبخستگی پایین دست

دنا بیدار<sup>۱</sup>، سید امین اصغری پری<sup>۲\*</sup>، سید محسن سجادی<sup>۳</sup> و هوشنگ حسونی زاده<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی رودخانه دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان.

۲- نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان.

۳- استادیار، دانشکده علوم مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر.

تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۳

تاریخ دریافت: ۹۴/۴/۱۸

### چکیده

در این مقاله تغییرات الگوی آبخستگی پایین دست جت‌های مستغرق با قطرهای متفاوت و شکل‌های مختلف (دایره‌ای، مستطیلی، لوزی و مربعی) در جت‌های منفرد و اثر تغییر زاویه افقی میانی در جت‌های مرکب مایل بررسی شده است. در این راستا، پارامترهای مؤثر بر رفتار جت‌های مستغرق، بررسی و با استفاده از تحلیل ابعادی روابط بدون بعد مؤثر استخراج شد. به منظور بررسی ارتباط بین این پارامترها یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه رسوب سازمان آب و برق استان خوزستان ساخته و آزمایش‌ها در دبی‌های متفاوت انجام گردید. سپس ابعاد آبخستگی پایین دست جت، اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد از نظر افزایش الگوی آبخستگی مربوط به جت لوزی با متوسط ۲۲ درصد افزایش پارامترهای آبخستگی نسبت به جت مستطیلی، کمترین قطر بیرونی با ۱۸۳ درصد افزایش پارامترهای مذکور نسبت به بیشترین قطر بوده. همچنین افزایش سه برابری در زاویه میانی جت‌های مرکب مایل موجب افزایش ۵۸ درصد در پارامترهای آبخستگی می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: جت مستغرق، آبخستگی، زاویه، شکل جت، قطر جت

## Experimental Study of Scouring Pattern Due to Orifice Submerged Jets

D. Bidar<sup>1</sup>, S. A. Asghari Pari<sup>2\*</sup>, S. M. Sajjadi<sup>3</sup> and H. Hassoni Zadeh<sup>4</sup>

1- MSc Student of River Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology.

2\*- Assistant Professor., Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology.

3- Assistant Professor., Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz.

4- Assistant Professor., Department of Water Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University.

Received: 9 July 2015

Accepted: 25 October 2015

### Abstract

In this article, downstream scour patterns were investigated for submerged jets with different diameters and shapes (circular, rectangle, diamond and square) for single jets and also effects of different angles of crossing compound jets. For this aim, all effective parameters of submerged jets behavior were studied and the effective dimensionless relationships were derived according to dimensional analysis. In order to analyze this relationship, a physical model was built in KWPA laboratory and tests were run with different discharges. Then dimensions of scour patterns were measured in downstream of jets. The results indicated that the best development in pattern of scour belongs to diamond jet with average of 22% increasing in comparison by rectangle jet and the minimum of outer diameter with average of 183% increasing in comparison by the maximum one, also threefold increasing of crossing jets angles cause 58% increasing in the parameters of scour.

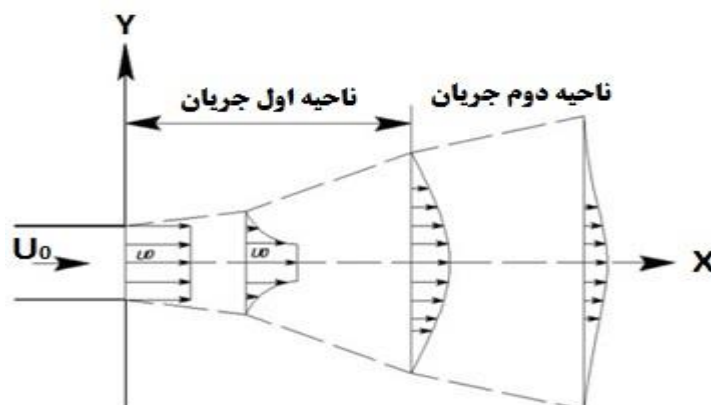
**Keywords:** Submerged jet, Sediment scouring, Angle, Shape of jet, Diameter of jet.

خاکسترهای آتشفشانی در هوا مثالی از این پدیده در طبیعت

می‌باشد.

### مقدمه

برحسب تعریف جت هیدرولیکی عبارت است از جریان متلاطمی که از یک منبع به‌طور مداوم خارج می‌شود. خارج شدن



شکل ۱- پلان الگوی خطوط جریان خروجی از جت (به نقل از احدیان، ۱۳۸۸)

حداکثر عمق حفره آبستتگی افزایش و یا کاهش می‌یابد. بر طبق نظر آدریبیگ و راجاراتنام<sup>۴</sup> (۱۹۹۸) فرایند چرخشی که باعث پر و خالی شدن حفره آبستتگی می‌شود موجب می‌گردد که ابعاد حفره آبستتگی به شرایط تعادل نرسد. آدوس و اسکورتینو<sup>۵</sup> (۲۰۰۶) به مطالعه آزمایشگاهی روی هیدرولیک جت و آبستتگی ناشی از جت‌های مستغرق صفحه‌ای پرداخت. در این آزمایش با عکس برداری سعی شد تا توسعه آبستتگی ناشی از جت صفحه‌ای به تصویر کشیده شود و به تبع آن زمان تعادل به خوبی قابل تشخیص بود. در این مطالعه هیدرولیک جت‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت و پروفیل عمقی سرعت در دو حالت بستر صلب و فرسایش‌پذیر به وسیله آلتراسونیک پروفایلر برداشت شد. وی مشاهده نمود که تمامی پارامترهای طول، عمق آبستتگی در دقایق ابتدایی آزمایش به سرعت افزایش می‌یابند در حالی که با گذشت زمان این تغییرات کندتر پیش می‌رود. سوی و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۰۸) به بررسی تاثیر عمق پایاب و عرض کانال بر الگوی آبستتگی توسط جت مربعی پرداخت و به این نتیجه رسید که با کاهش عمق پایاب و افزایش عرض فلوم، پهنای آبستتگی نیز افزوده می‌شود. پاگلیارا و پالمو<sup>۷</sup> (۲۰۱۳) به بررسی الگوی آبستتگی جت‌های مستغرق مایل تحت تاثیر عواملی چون عمق پایاب، زاویه بین جت‌های مایل دوتایی و فاصله عمودی جت‌ها از سطح آب پایاب پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که در حضور عمق پایاب زیاد، کاهش قابل ملاحظه‌ای در عمق چاله آبستتگی ناشی از جت مایل دوتایی رخ می‌دهد. احدیان و موسوی جهرمی<sup>۲</sup> (۲۰۰۹) خصوصیات هندسی تراژکتوری جت مستغرق با نازل‌های دایره‌ای و قطرهای متفاوت را بررسی کردند و دریافتند که طول تراژکتوری با افزایش قطر از ۵ به ۸ میلی‌متر کاهش می‌یابد. ضمناً مشاهدات آن‌ها حاکی از افزایش طول تراژکتوری با افزایش غلظت سیال جت بود. همچنین عوامل مؤثر بر جریان جت‌های

جریان جت‌های متلاطم نوعی از جریان‌های آشفته بوده که براساس نیروهای مومنتم بررسی می‌شوند. جریان جت معمولاً توسط یک منبع مداوم تحت اثر نیروهای مومنتم انتشار می‌یابد. مطابق تحقیق احدیان (۱۳۸۸)، در شکل (۱) ناحیه اول جریان تحت عنوان جریان در حال توسعه و ناحیه دوم جریان به عنوان جریان توسعه یافته نامیده می‌شود. رفتار جت متلاطم به عوامل متعددی بستگی دارد که مهمترین آنها پارامترهای جت، پارامترهای محیطی و پارامترهای هندسی می‌باشد.

پارامترهای جت شامل توزیع سرعت اولیه جت، جرم مخصوص سیال جت و مومنتوم جریان می‌باشد. پارامترهای محیطی شامل دمای سیال پذیرنده، جرم مخصوص سیال پذیرنده، جرم مخصوص لایه‌های سیال اطراف جت و غیره می‌باشند و پارامترهای هندسی شامل شکل جت، مرزها و نزدیکی آنها به محل جت، موقعیت عمودی جت (عمق شناوری)، ابعاد جت و زاویه آن با افق و ارتفاع جت ریزشی در سیال پذیرنده می‌باشد (سلیمانی بابرصاد و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۳).

یکی از راه‌های سریع برای رقیق نمودن آلودگی‌هایی که به رودخانه یا دریاها می‌ریزند استفاده از جت‌های مستغرق متلاطم است که می‌تواند در فاصله زمانی کوتاهی مقدار زیادی آب و جریان آلوده را به علت شرایط تلاطمی خود مخلوط نموده و اثر مخرب آن را سریعاً کاهش دهد. از کاربردهای دیگر جت‌ها استفاده از انرژی جت‌های هیدرولیکی برای شستشوی رسوبات کف مخازن ذخیره، مخازن سدها، چاله‌های پمپاژ و دهانه آبگیرها و غیره می‌باشد. در این حالت از چاله آبستتگی که جت در پایین دست خود ایجاد می‌کند برای شستشو یا آبشویی استفاده می‌شود (احدیان و موسوی جهرمی<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹).

مطابق تحقیق علی و لیم<sup>۳</sup> (۱۹۸۶) درخصوص اثر عمق پایاب بر ابعاد حفره آبستتگی، مقدار حدی برای عمق پایاب وجود دارد که در صورتی که عمق پایاب از این مقدار بیشتر و یا کمتر شود،

4- Aderibigbe and Rajaratnam

5- Adduce & Sciortino

6- Sui *et al.*

7- Pagliara and Palermo

1- Soleimani Babarsad *et al.*

2- Ahadiyan and Musavi Jahromi

3- Ali and Lim

### تحلیل ابعادی

همان طور که ذکر شد پارامترهای اساسی در بررسی جت‌های مستغرق به پارامترهای هندسی نازل، شدت جریان در آن و پارامترهای فیزیکی سیال پذیرنده دسته‌بندی می‌شوند. در تحلیل ابعادی ترم‌های دخیل در این پدیده بازنویسی شده و سپس پارامترهایی که در این تحقیق ثابت فرض می‌شوند و یا از تأثیر ناچیزی برخوردارند حذف گردیدند. پارامترهای موثر به صورت زیر بیان می‌شود که:

$$f(U_0, \rho, \mu, \Delta\rho, g, d_{95}, \alpha, \beta, d, x_{\max}, z_m, y_m, h_m, x_{ym}, x_m) = 0 \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $U_0$ : سرعت خروجی جت،  $\rho$ : چگالی سیال جت،  $\mu$ : لزجت دینامیکی،  $\Delta\rho = \rho_g - \rho$ : اختلاف چگالی سیال با چگالی ذرات رسوبی،  $g$ : شتاب ثقل،  $d_{95}$ : قطر موثر ذرات رسوبی،  $\alpha$ : زاویه میانی جت‌های مرکب نسبت به افق،  $\beta$ : پارامتر شکل جت،  $d$ : قطر دایره‌ی هم‌مساحت جت،  $x_{\max}$ : حداکثر طول آبستگي،  $z_m$ : حداکثر عمق آبستگي،  $y_m$ : حداکثر عرض آبستگي،  $h_m$ : ارتفاع پشته رسوبی،  $x_{ym}$ : طول متناسب با  $y_m$  و  $x_m$ : حداکثر فاصله پشته رسوبی در اثر ترسیب می‌باشد که در شکل (۲)، شش پارامتر آبستگي بصورت شماتیک نشان داده شده است. پس از تحلیل رابطه ۱، پارامترهای بی‌بعد به‌صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$f(\text{Re}, Fr_d, \alpha, \frac{\beta}{d}, \frac{x_{\max}}{d}, \frac{y_m}{d}, \frac{z_m}{d}, \frac{h_m}{d}, \frac{x_{ym}}{d}, \frac{x_m}{d}) = 0 \quad (2)$$

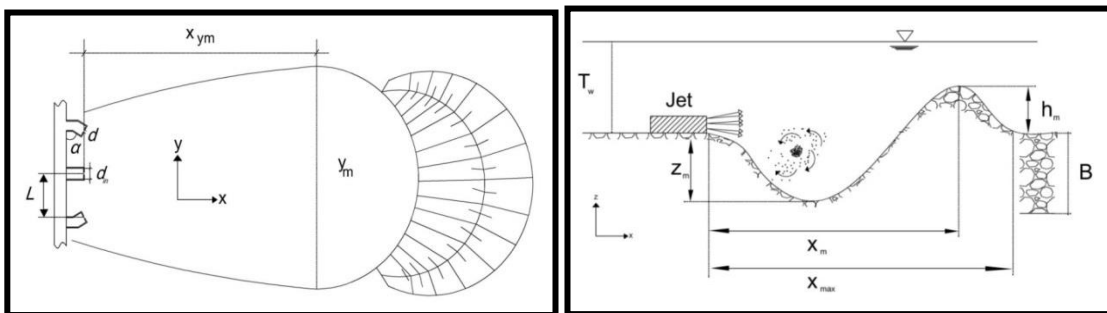
راجاتام<sup>۵</sup> (۱۹۷۶) نشان داد که اگر مقدار عدد رینولدز از ۳۰۰۰ بیشتر باشد، تأثیر آن در ایجاد حفره آبستگي متاثر از جت صفحه‌ای، قابل چشم‌پوشی است. لذا در این تحقیق نیز با توجه به اینکه در تمامی آزمایش‌ها این تحقیق، عدد رینولدز محاسبه شده جریان جت در محدوده جریان متلاطم قرار گرفته، بنابراین در ارائه نتایج از عدد رینولدز صرف‌نظر شده است. بنابراین رابطه (۳) نتیجه می‌شود:

$$f(\frac{x_{\max}}{d}, \frac{y_m}{d}, \frac{z_m}{d}, \frac{h_m}{d}, \frac{x_{ym}}{d}, \frac{x_m}{d}) = f(Fr_d, \alpha, \frac{\beta}{d}) \quad (3)$$

مستغرق در منابع آب پذیرنده ساکن را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند با افزایش زاویه همگرایی جت از ۱۵ درجه به ۹۰ درجه مقدار طول نهایی مرز بالایی تراژکتوری در حدود ۲۵ درصد و مرز پایینی در حدود ۲۸ درصد افزایش داشته است. مهرآئین<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) به بررسی تأثیر پارامترهای مهمی مانند سرعت جت، فاصله افقی جت از دیواره بالادست فوم و عمق پایاب بر پروفیل طولی آبستگي پرداخت. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش فاصله افقی جت، عمق چاله آبستگي کمتر و طول آن بیشتر می‌گردد. همچنین با افزایش عمق پایاب، عمق آبستگي در حالت دینامیک کمتر و در استاتیک بیشتر می‌شود. سلیمانی بابرصاد و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۳) با ساخت مدل آزمایشگاهی، بر رفتار نازل‌های مستغرق منفرد و چندگانه را مطالعه کردند. علاوه بر مطالعه تأثیر جت بر روی بستر فرسایش‌پذیر، مشخصات هیدرولیکی جت مستغرق را نیز برداشت نمودند. در این آزمایش‌ها از نازل‌هایی با زاویه داخلی مختلف (۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ درجه) استفاده شد. نتیجه آزمایش‌ها حاکی از آن بود که با افزایش زاویه داخلی نازل، جت حاصله سریع‌تر مستهلک می‌شود اما در عین حال عمق و طول آبستگي افزایش می‌یابد. لذا در یک دبی ثابت بیشترین آبستگي برای نازل ۹۰ درجه مشاهده شد. رفتار هیدرولیکی نازل‌های چندگانه نیز در این تحقیق مورد توجه قرار گرفت اما نتایج حاکی از، تأثیر ناچیز جت‌ها در تقویت یکدیگر بود، یعنی ابعاد حفره آبستگي نسبت به نازل‌های منفرد تغییر محسوسی نداشت. ضمناً هم‌پوشانی جت‌ها تنها به مقدار ناچیزی سرعت محوری را افزایش می‌داد. منصورینزاد و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۳) به بررسی آبستگي پایین‌دست جت‌های دایره‌ای، مربع، و مستطیل در سه دبی (۱/۶، ۲ و ۲/۵ مترمکعب بر ساعت) و در سه رقوم ارتفاعی متفاوت پرداخت. نتایج نشان‌دهنده آن بود که بهترین عملکرد از نظر افزایش الگوی آبستگي مربوط به جت مربعی و در حالت مماس بر بستر رخ می‌دهد. جامع و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۳) به بررسی الگوی آبستگي ناشی از تغییر ارتفاع جت پرداختند. در این تحقیق به بررسی پارامترهای تأثیرگذار هندسی جت از جمله تأثیر قطرهای متفاوت در جت‌های منفرد و همچنین زوایای افقی متفاوت در جت‌های مرکب سه‌تایی مایل بر الگوی آبستگي تشکیل شده در پایین‌دست جت پرداخته شده، همچنین طیف بیشتری از شکل‌های جت در حالت منفرد که در تحقیقات گذشته انجام شده بود، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از تحقیق حاضر تعیین قطر و شکلی از جت‌های منفرد و همین‌طور تعیین کارآمدترین زاویه میانی جت‌های مرکب سه‌تایی به منظور رسیدن به بهینه‌ترین حالت افزایش و کاهش آبستگي می‌باشد.

- 1- Mehraein
- 2- Soleimani Babarsad et al.
- 3- Mansouri Nezhad et al.
- 4- Jame et al.

بیدار و همکاران: بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه جت‌های روزنه‌ای...



شکل ۲- پارامترهای مختلف الگوی آبشستگی در پلان و پروفیل طولی مقابل جت



شکل ۳- انواع جت‌ها

جدول ۱- گروه‌بندی آزمایش‌ها

تعداد آزمایش	نوع جت	دبی لیتر بر ثانیه	تعداد جت	گروه
۱۶	قطر دایره ۱ سانتی‌متر	۰/۴۵	یک	یک
	۰/۸۸۶×۰/۸۸۶ اضلاع مربع	۰/۵۶		
	۰/۴۴۳×۱/۷۷۷ اضلاع مستطیل	۰/۶۹		
	۰/۸۸۶×۰/۸۸۶ اضلاع لوزی	۰/۸۳		
۱۲	قطر دایره ۰/۸ سانتی‌متر	۰/۴۵	یک	دو
	قطر دایره ۱ سانتی‌متر	۰/۵۶		
	قطر دایره ۱/۵ سانتی‌متر	۰/۶۹		
۱۲	درجه $\alpha=30$	۰/۴۵	سه	سه
	درجه $\alpha=45$	۰/۵۶		
	درجه $\alpha=60$	۰/۶۹		
	درجه $\alpha=90$	۰/۸۳		

**مدل فیزیکی**

آزمایش‌ها در فلوم آزمایشگاهی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۶، ۱/۵ و ۱ متر در آزمایشگاه رسوب سازمان آب و برق خوزستان انجام گردید. در این آزمایش از دو پمپ گریز از مرکز سری استفاده شد که هر یک توان تأمین دبی و فشاری به ترتیب معادل ۲۰ تا ۱۰۰ لیتر بر دقیقه و ۲۵ تا ۳۵ متر را داشتند. ضمن اینکه از یک دستگاه اندازه‌گیری دبی (روتامتر) برای کنترل و اندازه‌گیری دبی ورودی به لوله هدایت‌کننده با ظرفیت ۴/۴۵-۰/۴۵ لیتر بر ثانیه استفاده گردید. دقت این دستگاه از یک تا چهار درصد خطا می‌باشد. مطابق شکل (۳)، شش نوع نازل به شکل‌های دایره‌ای با قطرهای ۰/۸، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر، مربعی با ابعاد ۰/۸۸۶ سانتی‌متر، مستطیلی با ضلع بزرگ ۱/۷۷ سانتی‌متر و ضلع کوچک ۰/۴۴۳ سانتی‌متر و لوزی با ابعاد ۰/۸۸۶ سانتی‌متر از جنس آلومینیم ساخته شد. همچنین در بخش جت‌های مرکب از رابط‌های با سه زاویه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه استفاده گردید.

جت‌ها در رقوم ۲۰ سانتی‌متری از کف فلوم کار گذاشته شده و تعداد ۳۶ آزمایش (پس از حذف آزمایش‌های تکراری) برای دبی‌های مختلف ۰/۴۵، ۰/۵۶، ۰/۶۹ و ۰/۸۳ لیتر بر ثانیه نیز انجام گردید. گروه‌های مختلف آزمایش‌ها مطابق جدول (۱)

می‌باشد. همچنین نمونه‌ای از آزمایش‌ها انجام شده در شکل‌های (۴) و (۵) نمایش داده شده است.

مطابق با جدول (۱) محدوده عدد رینولدز بین ۱۸۸۶۷ تا ۱۶۵۸۲۰ و مقدار عدد فرود دنسیومتریک بین ۱۱ تا ۹۷ می‌باشد. در این تحقیق برای به‌دست آوردن زمان تعادل، ۲۰ آزمایش مقدماتی انجام گردید. این ۲۰ آزمایش هر کدام به مدت شش ساعت و در چهار دبی مختلف، انجام شد. مطابق شکل (۶) پس از گذشت ۱۵۰ دقیقه تقریباً ۹۸ درصد آبشستگی نسبت به زمان ۳۶۰ دقیقه اتفاق افتاده است. بر طبق تحقیقات رنجبر و همکاران (۱۳۸۵) با مطالعه بر روی تغییرات زمانی حفره آبشستگی نتیجه گرفته شد که حداکثر تغییرات در ابعاد حفره آبشستگی در دقایق اولیه رخ می‌دهد و پس از آن نرخ این تغییرات کاهش می‌یابد به نحوی که پس از گذشت ۸۰ دقیقه تقریباً ۷۰ درصد آبشستگی اتفاق افتاده است. همچنین طبق تحقیقات حسینی و همکاران (۱۳۸۷) قسمت اعظم آبشستگی در زمان‌های اولیه آزمایش رخ داده و سپس روند آبشستگی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است به‌طوری‌که با گذشت مدت زمان بیشتر تغییرات زیادی در افزایش ابعاد آبشستگی ملاحظه نمی‌شود. لذا با عنایت به تحقیقات گذشته و نتایج آزمایش‌ها تعادل در این تحقیق، زمان ۱۵۰ دقیقه به‌عنوان مدت زمان در آزمایش‌ها لحاظ گردیده است.

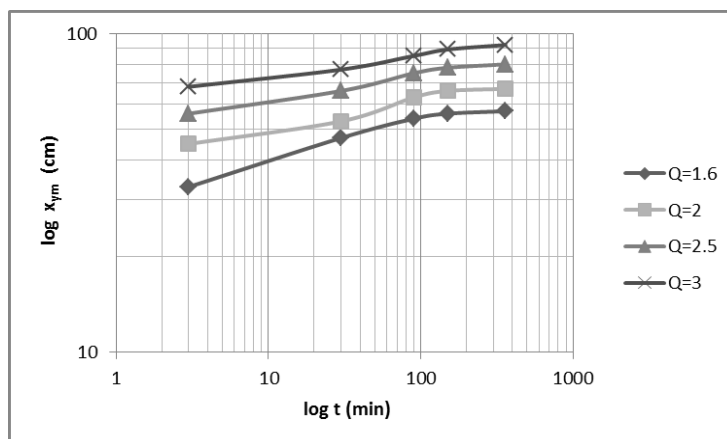


شکل ۴- الگوی آبشستگی ناشی از جت دایره‌ای



شکل ۵- الگوی آبشستگی ناشی از جت مرکب مایل با زاویه افقی میان جت‌ها

بیدار و همکاران: بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه جت‌های روزنه‌ای...



شکل ۶- نمودار لگاریتمی مربوط به آزمایش تعادل

جدول ۲- مشخصات ذرات رسوبات (قطر به میلی‌متر)

$d_{10}$	$d_{16}$	$d_{50}$	$d_{84}$	$d_{95}$	$\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$	$G_s$
0/6	0/6	0/9	1/6	1/8	1/57	2/6
6	5	8				4

بررسی دبی ۰/۶۹ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. از نتایج این گروه از تحقیق اینگونه استنباط می‌شود که با توجه به شکل خروجی جت، در جت مربعی خطوط جریان مماس بر ضلع پایینی فشرده‌تر می‌شود و منحنی آن درست در محل خروج از جت به سمت بالا سوق می‌گیرد. در حالی که این خطوط در جت لوزی شکل در محل رأس لوزی قرار گرفته و آزادتر عبور می‌کند، لذا قدرت برای ایجاد عمق آبستنگی بیشتر را دارد. همچنین در تمامی نتایج مشاهده گردید که با افزایش عدد فرود دنسیومتریک، الگوی آبستنگی توسعه بیشتری می‌یابد. توسعه الگوی آبستنگی به ترتیب از کمترین به بیشترین مقدار مربوط به جت مستطیلی، دایره‌ای با قطر یک سانتی‌متر، مربعی و سپس لوزی شکل نتیجه شد. همچنین پارامترهای حداکثر عمق، عرض و طول بی‌بعد الگوی آبستنگی مربوط به جت لوزی شکل با بالاترین راندمان یعنی دبی ۰/۶۹ لیتر بر ثانیه، به ترتیب ۱۹/۵، ۶۹ و ۱۶۳ به دست آمد.

مطابق با نتایج منسوری‌نژاد<sup>۱</sup> (۲۰۱۳)، از میان جت‌های مستطیل، دایره و مربع در سه دبی آزمایش شده بیشترین توسعه آبستنگی مربوط به جت مربعی شکل بوده، که در تحقیق حاضر با آزمایش جت لوزی شکل در دبی‌های بیشتر مشاهده شد که این جت از راندمان بیشتری در توسعه بیشتر الگوی آبستنگی برخوردار است. در جدول (۳) نتایج بی‌بعد آزمایش پارامترها برای گروه یک ارائه شده است.

رسوبات مورد استفاده در این تحقیق، ماسه شسته الک شده با دانه‌بندی ذکر شده در جدول (۲)، یکنواخت و فاقد ذرات لای و رس می‌باشد. پس از آبیگری فلوم به کمک دریچه کشویی انتهای فلوم و تنظیم رقم ارتفاع آب در تراز ۵۰ سانتی‌متری بر روی رسوبات و تأمین عمق استغراق لازم بر روی نازل، با تغییر بازشدگی شیر لوله تغذیه جت‌ها و قرائت مداوم روتامتر، میزان دبی نازل تنظیم گردید. سپس به مدت زمان تعادل محاسبه شده، جت‌ها به طور مداوم روشن بوده و پس از آن به کمک دریچه انتهای فلوم و سیستم زهکش کف فلوم آب به صورت کامل تخلیه می‌شد. در این مرحله به‌وسیله ارابه سه بعدی و صفحه مدرج بر روی آن و متر لیزری ساخت کشور اتریش با عنوان تجاری لایکا دیستو با دقت  $1 \pm 0.5$  میلی‌متر، پارامترهای آبستنگی برای هر آزمایش اندازه‌گیری گردید.

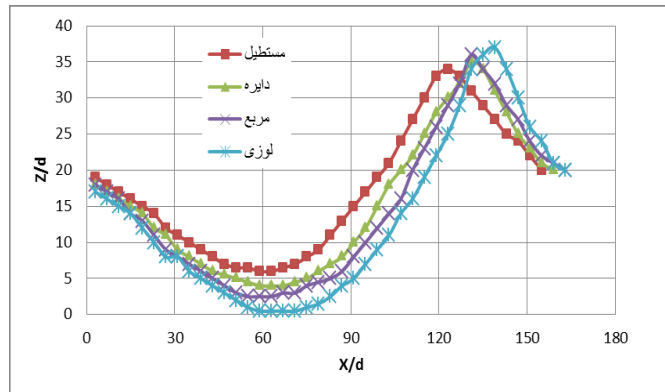
### نتایج و بحث

پس از برداشت داده‌ها در هر آزمایش، پروفیل طولی آبستنگی به‌صورت پارامترهای بی‌بعد  $Z/d$  در مقابل  $X/d$  ترسیم گردید که نتایج به‌طور اختصار برای هر گروه از آزمایش‌ها و به ازای دبی ۰/۶۹ لیتر بر ثانیه در شکل (۷) نشان داده شده است.

با توجه به نتایج آزمایش‌ها مطابق جدول (۳) و شکل (۷)، بهترین عملکرد از نظر افزایش توسعه آبستنگی مربوط به جت لوزی شکل و بیشترین دبی یعنی ۰/۸۳ لیتر بر ثانیه نتیجه شد، ولی با توجه به آنکه در این دبی آبستنگی جت لوزی شکل به کف فلوم برخورد نموده و به صورت دوبعدی گردید، لذا ملاک

ترتیب ۴، ۶ و ۱۰ درصد بیشتر از جت های مربعی، دایره ای و مستطیلی است. این درصدها برای پارامتر حداکثر عرض آبستگي ۱۳، ۱۶ و ۲۳ درصد و برای پارامتر حداکثر عمق آبستگي ۶، ۲۳ و ۳۳ درصد می باشد.

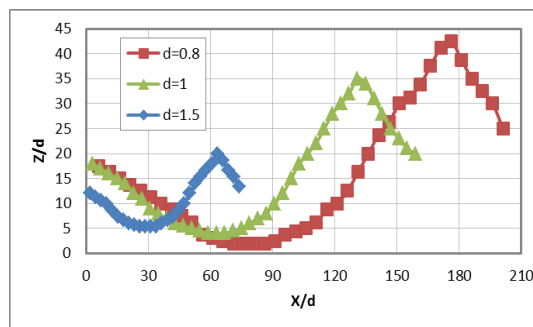
با توجه به نتایج، با تغییر شکل جت از مستطیلی به لوزی شکل، به طور متوسط پارامترهای  $\frac{x_{max}}{d}$ ،  $\frac{y_m}{d}$  و  $\frac{z_m}{d}$  به ترتیب به میزان ۱۰، ۲۳ و ۳۳ درصد افزایش می یابد. همچنین مشاهده می شود که حداکثر طول آبستگي در جت لوزی به



شکل ۷- گروه یک: پروفیل طولی آبستگي مقابل جت با اشکال مختلف به ازای دبی ۰/۶۹ لیتر بر ثانیه

جدول ۳- نتایج بی بعد آزمایش گروه یک

نوع جت	دبی (lit/s)	$\frac{z_m}{d}$	$\frac{y_m}{d}$	$\frac{x_{max}}{d}$
مستطیل	۰/۴۵	۱۰	۴۱	۱۱۵
	۰/۵۶	۱۳	۴۹	۱۳۹
	۰/۶۹	۱۴	۵۶	۱۵۵
	۰/۸۳	۱۸	۶۱	۱۶۳
دایره	۰/۴۵	۱۱	۴۶	۱۱۹
	۰/۵۶	۱۳	۵۲	۱۴۷
	۰/۶۹	۱۶	۶۱	۱۵۹
	۰/۸۳	۱۹	۶۷	۱۶۷
مربع	۰/۴۵	۱۳	۴۷	۱۲۳
	۰/۵۶	۱۵	۵۵	۱۴۷
	۰/۶۹	۱۸	۶۵	۱۶۳
	۰/۸۳	۲۰	۷۰	۱۷۱
لوزی	۰/۴۵	۱۴	۵۰	۱۳۵
	۰/۵۶	۱۵	۶۱	۱۵۱
	۰/۶۹	۲۰	۶۹	۱۶۳



شکل ۸- گروه دو: پروفیل طولی آبستگي جت دایره ای به ازای قطرهای متفاوت در دبی ۰/۶۹ لیتر بر ثانیه

جدول ۴- نتایج بی‌بعد آزمایش گروه دو

نوع جت	دبی (lit/s)	$\frac{z_m}{d}$	$\frac{y_m}{d}$	$\frac{x_{max}}{d}$
دایره با قطر ۰/۸ سانتی‌متر	۰/۴۵	۱۶	۷۱	۱۷۶
	۰/۵۶	۲۱	۷۴	۱۸۶
	۰/۶۹	۲۳	۸۰	۲۰۱
دایره با قطر ۱ سانتی‌متر	۰/۴۵	۱۱	۴۶	۱۱۹
	۰/۵۶	۱۳	۵۲	۱۴۷
	۰/۶۹	۱۶	۶۱	۱۵۹
	۰/۸۳	۱۹	۶۷	۱۶۷
دایره با قطر ۱/۵ سانتی‌متر	۰/۴۵	۶	۲۲	۶۳
	۰/۵۶	۷	۲۶	۶۶
	۰/۶۹	۸	۳۰	۷۴
	۰/۸۳	۹	۳۵	۸۷

با توجه به نتایج، با کاهش قطر جت از ۱/۵ به ۰/۸ سانتی‌متر، به‌طور متوسط پارامترهای  $\frac{x_{max}}{d}$ ،  $\frac{y_m}{d}$  و  $\frac{z_m}{d}$  به ترتیب به میزان ۱۷۸، ۱۹۰ و ۱۸۱ درصد افزایش می‌یابد.

همچنین برای ارائه رابطه مناسب میان عدد فرود دنسیومتریکی جریان و ابعاد آبستگي، با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسبت به استخراج ضرایب معادله پیشنهادی برای الگوی آبستگي جت براساس اندازه‌های متفاوت قطر جت اقدام گردید که روابط به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{x_{max}}{d} = 2.33 * Fr_d + 29.53$$

$$R^2 = 0.9 \quad (4)$$

$$\frac{y_m}{d} = 0.95 * Fr_d + 9.71$$

$$R^2 = 0.92 \quad (5)$$

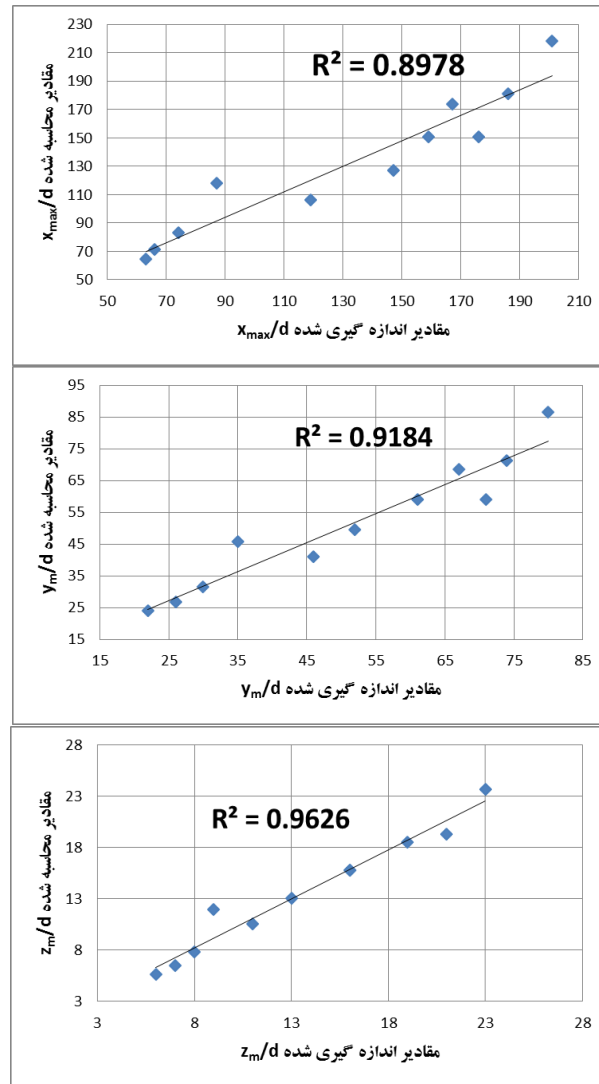
$$\frac{z_m}{d} = 0.27 * Fr_d + 1.57$$

$$R^2 = 0.97 \quad (6)$$

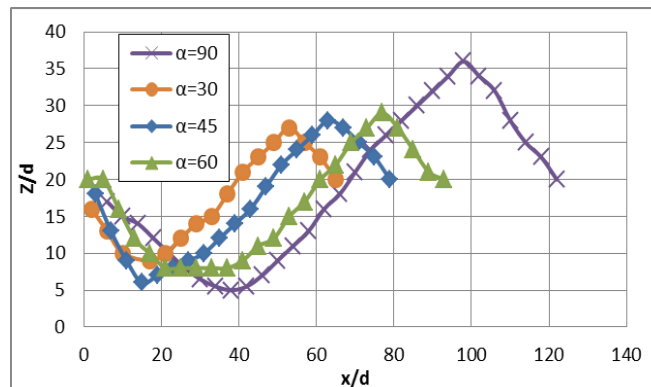
همچنین در شکل (۹) نمودار مقادیر محاسبه شده در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داده شده است:

با توجه به نتایج آزمایش‌ها مطابق جدول (۴) و شکل (۸)، بهترین عملکرد از نظر توسعه آبستگي مربوط به جت با کمترین قطر، یعنی ۰/۸ سانتی‌متر و بیشترین دبی یعنی ۰/۸۳ لیتر بر ثانیه بوده، ولی با توجه به آنکه در این دبی آبستگي جت با قطر ۰/۸ سانتی‌متر به کف فلوم برخورد نموده و به صورت دوبعدی گردید، لذا ملاک بررسی، دبی ۰/۶۹ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در تمامی نتایج مشاهده گردید که با افزایش عدد فرود دنسیومتریکی، الگوی آبستگي توسعه بیشتری یافته و همین‌طور با کاهش قطر خروجی جت افزایش الگوی آبستگي مشاهده شد. در واقع کاهش قطر و افزایش دبی موجب افزایش سرعت خروجی از جت و به تبع آن عدد فرود دنسیومتریکی و همین‌طور مومتم جریان شده که موجب توسعه بیشتر آبستگي می‌گردد. مطابق با نتایج احدیان و چهرمی<sup>(۲۰۰۹)</sup> مبنی بر تاثیر کاهش قطر جت بر افزایش توزیع سرعت خروجی از جت، در تحقیق حاضر اثر کاهش قطر جت در توسعه الگوی آبستگي نیز مشاهده شد که نتیجه می‌گردد به طور کلی کاهش قطر جت به علت افزایش سرعت و قدرت جریان خروجی توانایی پیشروی بیشتری در الگوی آبستگي را نتیجه می‌دهد. پارامترهای حداکثر عمق، عرض و طول بی‌بعد الگوی آبستگي مربوط به جت با قطر ۰/۸ سانتی‌متر با بالاترین راندمان یعنی دبی ۰/۶۹ لیتر بر ثانیه، به ترتیب ۲۳، ۸۰ و ۲۰۱ به‌دست آمد.





شکل ۹- مقایسه مقادیر محاسبه شده توسط روابط (۴)، (۵) و (۶) و مقادیر اندازه گیری شده در گروه آزمایش دو (جت با اندازه های متفاوت در قطر)



شکل ۱۰- سناریو سه: پروفیل طولی آبشستگی ناشی از جت مرکب مایل با زوایای افقی مختلف در دبی ۰/۶۹ لیتر بر ثانیه

جدول ۵- نتایج بی‌بعد آزمایش گروه سه

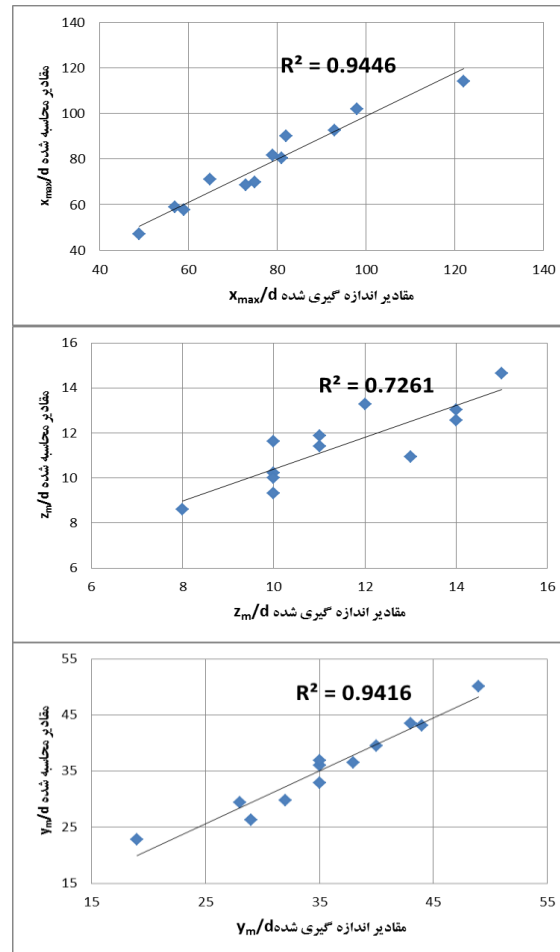
نوع جت	دبی (lit/s)	$\frac{z_m}{d}$	$\frac{y_m}{d}$	$\frac{x_{max}}{d}$
درجه ۳۰ $\alpha=30$	۰/۴۵	۸	۱۹	۴۹
	۰/۵۶	۱۰	۲۸	۵۷
	۰/۶۹	۱۱	۳۵	۶۵
درجه ۴۵ $\alpha=45$	۰/۴۵	۱۰	۲۹	۵۹
	۰/۵۶	۱۳	۳۵	۷۵
	۰/۶۹	۱۴	۴۰	۷۹
درجه ۶۰ $\alpha=60$	۰/۴۵	۱۰	۳۲	۷۳
	۰/۵۶	۱۰	۳۸	۸۱
	۰/۶۹	۱۲	۴۴	۹۳
درجه ۹۰ $\alpha=90$	۰/۴۵	۱۱	۳۵	۸۲
	۰/۵۶	۱۴	۴۳	۹۸
	۰/۶۹	۱۵	۴۹	۱۲۲

مستقیم (زاویه افقی ۹۰ درجه)، بالاترین راندمان در دبی ۲/۵ مترمکعب بر ساعت را دارا بوده که پارامترهای حداکثر عمق، عرض و طول بی بعد الگوی آبشستگی به ترتیب ۱۲، ۴۴ و ۹۳ به‌دست آمد.

با توجه به مقایسه نتیجه تحقیق پاگلاریا و پالمو (۲۰۱۳) در خصوص آبشستگی مقابل جت‌های مرکب دوتایی مایل در زوایای افقی ۳۰، ۵۲/۵ و ۷۵ درجه مبنی بر کاهش الگوی آبشستگی با کاهش زاویه، با نتیجه این گروه از آزمایش‌ها از تحقیق حاضر مشاهده شده است که الگوی آبشستگی در جت‌های سه‌تایی مرکب مایل هم همین روند کاهشی را به دنبال دارد. همچنین به طور کلی می‌توان عنوان کرد که نسبت به جت‌های منفرد، ترکیب سه‌تایی جت‌های مایل با توجه به تداخل بیشتر انرژی، مقادیری اثر کاهشی بیشتری را در مقایسه با ترکیب دوتایی از این نوع جت‌ها ایجاد می‌نماید، به طوری که حداکثر افزایش عمق آبشستگی جت منفرد نسبت به جت مرکب دوتایی تنها در زاویه ۳۰ درجه و به میزان ۴۴ درصد بوده در حالی که مقدار متناظر این درصد نسبت به جت مرکب سه‌تایی در تحقیق حاضر ۶۳ درصد می‌باشد.

با توجه به نتایج، با افزایش زاویه میانی جت‌های مایل از ۳۰ درجه به ۹۰ درجه، به‌طور متوسط پارامترهای  $\frac{x_{max}}{d}$ ،  $\frac{y_m}{d}$  و  $\frac{z_m}{d}$  به ترتیب به میزان ۷۶، ۵۹ و ۳۸ درصد افزایش می‌یابد.

با توجه به نتایج آزمایش‌ها مطابق جدول (۵) و شکل (۱۰)، بهترین عملکرد از نظر توسعه آبشستگی مربوط به بیشترین زاویه ۹۰  $\alpha$ ، درجه در بیشترین دبی یعنی ۰/۶۹ لیتر بر ثانیه بوده و همین‌طور کمترین توسعه آبشستگی مربوط به جت با کمترین زاویه ۳۰ درجه و کمترین دبی ۰/۴۵ لیتر بر ثانیه بوده است. علت این نتیجه آن است که با چیدمان مایل جت‌ها، خطوط جریان با یکدیگر در راستای محور طولی تداخل یافته و مقداری از انرژی جریان جت میانی که خطوط جریان آن مسقیم می‌باشد، مستهلک می‌گردد. در صورتی که در جت مرکب با زاویه ۹۰ درجه این تداخل بسیار کمتر و تنها در محل تلاقی مرزهای بیرونی ناحیه جریان رخ می‌دهد. با مقایسه شکل‌های (۷)، (۸) و (۱۰) مشاهده می‌شود که جت‌های منفرد عملکرد بهتری در توسعه الگوی آبشستگی در مقایسه با جت‌های مرکب با همان دبی خروجی را دارند. طبق این نتایج علاوه بر روند افزایشی الگوی آبشستگی جت‌ها با افزایش عدد فرود دنسیومتری، با افزایش زاویه افقی میان جت‌ها، ابعاد آبشستگی بیشتری نیز مشاهده گردید و بالعکس (البته به جز زاویه ۴۵ درجه که مقادیر بیشتری در پارامتر عمق نسبت به جت با زاویه ۶۰ درجه از خود نشان داد). همچنین با مقایسه حالت ۹۰ درجه (مستقیم) با حالت‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه (مایل)، مشاهده شد که در پارامترهای طول و عرض مربوط به این دو حالت اختلاف مقادیری بیشتری نسبت به پارامتر عمق رخ داده است. به عبارتی دیگر بیشتر حجم آبشستگی ناشی از جت‌های مرکب مایل به‌طور عمده در عمق و پس از آن در عرض و طول نمایان گردیده است. پارامترهای الگوی آبشستگی مربوط به جت مرکب مایل با زاویه ۶۰ درجه، بعد از جت مرکب



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر محاسبه شده توسط روابط (۷)، (۸) و (۹) و مقادیر اندازه گیری شده در گروه آزمایش سه (چیدمان مرکب با زوایای میانی متفاوت میان جت‌ها)

(۷)، (۸) و (۱۰) بطور کلی کمترین و بیشترین پارامتر طول آبشستگی به ترتیب مربوط به جت با زاویه ۳۰ درجه و جت با قطر ۰/۸ سانتی‌متر، کمترین و بیشترین پارامتر عمق و عرض آبشستگی به ترتیب مربوط به جت با قطر ۱/۵ سانتی‌متر و جت با قطر ۰/۸ سانتی‌متر نتیجه شد.

### نتیجه‌گیری

- در کلیه آزمایش‌ها با بیشتر شدن دبی جریان پروفیل آبشستگی پایین‌دست جت افزایش یافت. بیشترین میزان اثرپذیری در آزمایش‌ها با تغییر قطر بیرونی جت مشاهده شد، که علت آن دخیل بودن پارامتر قطر جت در تغییرات گسترده سرعت خروجی و به تبع آن عدد فرود دنسیومتریک می‌باشد.
- با تغییر در شکل جت، کمترین به بیشترین توسعه الگوی آبشستگی به ترتیب در جت‌های مستطیل، دایره، مربع و لوزی رخ داد.
- با کاهش قطر جت الگوی توسعه آبشستگی توسعه یافته و بالاترین قدرت جت برای ایجاد آبشستگی با ابعاد بزرگ‌تر مربوط به جت با قطر ۰/۸ سانتی‌متر می‌باشد که علت آن

با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسبت به استخراج ضرایب معادله پیشنهادی برای الگوی آبشستگی جت به‌عنوان تابعی از عدد فرود دنسیومتریک و پارامتر  $a=180-2\alpha$ ، در چیدمان مرکب با زوایای میانی متفاوت میان جت‌ها اقدام گردید:

$$\frac{x_{max}}{d} = 4 * Fr_d - 20.55 * a + 45.94 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.95$$

$$\frac{z_m}{d} = 0.54 * Fr_d - 1.34 * a + 5.45 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.73$$

$$\frac{y_m}{d} = 2.21 * Fr_d - 6.75 * a + 12.62 \quad (9)$$

$$R^2 = 0.94$$

همچنین در شکل (۱۱) نمودار مقادیر محاسبه شده در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داده شده است؛ با توجه به شکل‌های

بیدار و همکاران: بررسی آزمایشگاهی اثر هندسه جت‌های روزنه‌ای...

ترتیب ۱۷۸، ۱۹۰ و ۱۸۱ درصد در پارامترهای  $\frac{x_{max}}{d}$ ،

به‌عنوان بهترین و مؤثرترین روش پیشنهاد می‌گردد.  $\frac{z_m}{d}$  و  $\frac{y_m}{d}$

به‌طور کلی برای تعیین بهینه‌ترین حالت کاربرد جت‌ها در اهداف مختلف صنعت، از تحقیق حاضر نتیجه شد که به منظور افزایش کلی ابعاد آبشستگی، از جت با کمترین قطر ممکن و با شکل سطح مقطع لوزی و به‌صورت منفرد استفاده شود. به منظور کاهش کلی ابعاد آبشستگی، جت‌هایی با بیشترین قطر ممکن با شکل مقطع مستطیل و در صورت امکان با چیدمان مرکب که کمترین زاویه میانی افقی ممکن را دارا باشد، بکار برده شود.

### سپاسگزاری

از مسئولین سازمان آب و برق استان خوزستان که امکان استفاده از آزمایشگاه برای انجام تحقیق حاضر را فراهم نمودند، سپاسگزاری می‌شود.

### منابع

- ۱- احدیان، ج. ۱۳۸۸. تاثیر زاویه همگرایی بر طول اختلاط در جت‌های مستغرق با استفاده از مدل فیزیکی و ریاضی رساله دکترا، رشته سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.
- ۲- حسینی، پ.، ابراهیمی، ک.، صانعی، م. و م. مشعل ۱۳۸۷. بررسی تغییرات زمانی پروفیل آبشستگی پائین‌دست جت افقی مستغرق با استفاده از مدل آزمایشگاهی. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، تهران، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعت آب و برق.
- ۳- رنجبر، ح.، سلامتیان، الف. و م. قدسیان ۱۳۸۵. تغییرات زمانی حفره آبشستگی پایین‌دست جت‌های ریزشی آزاد. هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. اهواز، دانشگاه شهید چمران.
- 4- Adduce, C. and G. Sciortino. 2006. Scour due to horizontal turbulent jet: Numerical and experimental investigation. *Journal of Hydraulic Research*, 44(5): 663-673.
- 5- Aderibigbe, O. and N. Rajaratnam. 1998. Effect of sediment gradation on erosion by plane turbulent wall jets. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 124(10):1034-1042
- 6- Ahadiyan, J. and S.H. Musavi Jahromi. 2009. Effect of jet hydraulic properties on geometry of trajectory in circular buoyant jet in the static ambient flow. *Journal of Applied Sciences*, 9(21):3843-3849.
- 7- Ali, K.H.M. and S.Y. Lim. 1986. Local scour caused by submerged wall jets. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers part 2*, 4(81):607-645.
- 8- Jame, M., Ahadiyan, J. and M. Solimani Babarsad. 2013. Experimental study of scouring pattern due to circular submerged jet in shallow ambient fluid. *Journals of Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 3(1):103-108.
- 9- Mansouri Nezhad, M., Mousavi Jahromi, H., Sedghi, H. and H. Hassoni Zadeh. 2013. Experimental study of longitudinal velocity gradient in submerged hydraulic jet. *AENSI Journals of Advances in Environmental Biology*, 7(14):4873-4878.
- 10- Mehraein, M. 2011. Experimental study on scour due to simultaneous wall and impinging circular jet. *Hydraulics Conference, Hydrology and Water Resources Symposium, IAHR World Congress - Balance and Uncertainty*.

بیشتر شدن سرعت اولیه جت خروجی از نازل بوده که باعث بیشتر شدن قدرت جریان جهت توسعه آبشستگی می‌باشد.

- در دبی ثابت، چیدمان مرکب جت‌ها الگوی آبشستگی با ابعاد کمتری را نسبت به چیدمان منفرد از خود نشان می‌دهد.
- هرچه زاویه میانی جت‌های مرکب کاهش یابد ابعاد الگوی آبشستگی کوچک‌تر خواهد شد. به‌طوری که در حالت جت مرکب مستقیم (زاویه میانی ۹۰ درجه) الگوی آبشستگی توسعه بیشتری دارد.
- بهترین عملکرد از نظر افزایش ابعاد الگوی آبشستگی به ترتیب مربوط به کمترین قطر جت با متوسط ۱۸۳ درصد افزایش پارامترهای آبشستگی نسبت به بیشترین قطر، جت مرکب مستقیم با متوسط ۵۸ درصد افزایش در پارامترهای الگوی آبشستگی نسبت به جت مرکب مایل با کمترین زاویه میانی، جت لوزی شکل با متوسط ۲۲ درصد افزایش پارامترهای آبشستگی نسبت به جت مستطیلی می‌باشد.
- به منظور ایجاد بیشترین تغییرات در دامنه افزایش و کاهش ابعاد الگوی آبشستگی، تغییر در اندازه قطر جت با تأثیر به

- 11- Pagliara, S. and M. Palermo. 2013. Analysis of scour characteristics in presence of aerated crossing jets. *Australian Journal of Water Resources*, 16(2):163-172.
- 12-Rajaramam, N. 1976. *Turbulent jets*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- 13- Soleimani Babarsad, M., Musavi Jahromi, H., Kashkooli, H., Mohammad Vali Samani, H. and H. Sedghi. 2013. Experimental study of maximum velocity and effective length in submerged jet. *Indian Journal of Science and Technology*, 6(1):4873-4878.
- 14- Sui, J., Faruque, M.A.A. and R. Balachandar. 2008. Influence of channel width and tailwater depth on local scour caused by square jets. *Journal of Hydro-environment Research*, 2(1):39-45.