

## بررسی آزمایشگاهی الگوی آبشستگی پایین دست فشانه‌های مستغرق در چیدمان‌های منفرد و مرکب

دنا بیدار<sup>۱</sup>، سید امین اصغری پری<sup>۲\*</sup>، سید محسن سجادی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مقاله، تغییرات الگوی آبشستگی ناشی از جریان خروجی فشانه‌های مستغرق با تغییر در چیدمان فشانه‌ها بررسی شده است. در این راستا، کلیه فراسنج‌های موثر بر رفتار فشانه‌های مستغرق، بررسی، و با استفاده از تحلیل ابعادی، روابط بدون بعد استخراج شدند. جهت بررسی ارتباط بین این فراسنج‌ها یک نمونه فیزیکی در آزمایشگاه رسوب سازمان آب و برق استان خوزستان ساخته شد و آزمایش‌های مختلف در بده‌های متفاوت فشانه و در چهار الگو انجام گردیدند. این الگوها شامل بررسی اثر شکل فشانه در حالت چیدمان منفرد و مرکب، و همچنین اثر فاصله و زاویه در چیدمان مرکب می‌باشند. سپس ابعاد آبشستگی در پایین دست فشانه، اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان دادند که بهترین عملکرد از نظر توسعه‌ی آبشستگی در چیدمان منفرد مربوط به فشانه لوزی شکل می‌باشد، و این در حالی است که فراسنج شکل فشانه در چیدمان مرکب، فراسنج تأثیرگذاری نبوده است، همچنین، با افزایش فاصله‌ی افقی میان فشانه‌های مرکب، تمامی فراسنج‌های آبشستگی، به جز فراسنج عرض، کاهش می‌یابند، از سوی دیگر، کاهش زاویه‌ی میانی فشانه‌های مرکب مایل موجب کاهش الگوی آبشستگی می‌گردد.

**واژه های کلیدی:** آبشستگی فشانه مستغرق، عدد فرود دنسیومتریک، زاویه، چیدمان مرکب، چیدمان منفرد

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی رودخانه دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان

<sup>۲</sup> دانشیار دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان

تلفن: ۰۳۵ ۹۱۶۶۰۰۰۳ Email: asghari\_amin56@bkatu.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار دانشگاه شهید چمران اهواز

## مقدمه

فشانه آبی عبارت است از جریان متلاطمی که از یک منبع به‌طور مداوم خارج می‌شود. خارج شدن خاکسترهای آتشفشانی در هوا مثالی از این پدیده در طبیعت می‌باشد. جریان فشانه‌های متلاطم نوعی از جریان‌های آشفته است که معمولاً به‌وسیله یک منبع مداوم، تحت اثر نیروهای اندازه حرکت، انتشار می‌یابد. فراسنج‌های فشانه شامل اندازه حرکت جریان، توزیع سرعت اولیه فشانه، و جرم مخصوص سیال فشانه می‌باشد. فراسنج‌های محیطی شامل دمای سیال پذیرنده، جرم مخصوص سیال پذیرنده، جرم مخصوص لایه‌های سیال اطراف فشانه، و غیره می‌باشند. فراسنج‌های هندسی شامل ابعاد فشانه، شکل فشانه، مرزها و نزدیکی آنها به محل فشانه، موقعیت عمودی فشانه (عمق شناوری) و زاویه آن با افق، و ارتفاع فشانه ریزشی در سیال پذیرنده می‌باشند.

از کاربردهای فشانه‌ها، استفاده از کارمایه فشانه‌های آبی برای شستشوی رسوب‌های کف مخازن ذخیره، مخازن سدها، چاله‌های آبکشی و دهانه‌های آبگیر و غیره می‌باشد. در این حالت، از چاله‌ی آبشستگی که فشانه در پایین دست خود ایجاد می‌کند، جهت شستشو یا آبشویی استفاده می‌شود. یکی از راه‌های سریع برای رقیق نمودن آلودگی‌ها، که به دریاها می‌ریزند، استفاده از فشانه‌های مستغرق متلاطم است که می‌تواند در فاصله‌ی زمانی کوتاهی مقدار زیادی آب و جریان آلودگی را به‌علت شرایط تلاطمی خود مخلوط کرده و اثرات ویرانگر آن‌ها را سریعاً کاهش دهد. به‌وسیله‌ی این تحقیق، به هندسه و چیدمان‌های جدیدی از فشانه‌های منفرد و مرکب دست یافتیم که در افزایش آبشستگی در رسوب‌های ته‌نشین شده و علاوه بر آن می‌تواند، جهت کاهش میزان آبشستگی ناخواسته ای که در بستر پایین دست سازه‌ها رخ می‌دهد می‌تواند مثر ثمر باشد.

## تاریخچه تحقیق

مطابق تحقیق علی و لیم (۱۹۸۶) در خصوص اثر عمق پایاب بر ابعاد حفره آبشستگی، مقدار حدی برای عمق پایاب وجود دارد؛ در صورتی که عمق پایاب از این مقدار بیشتر و یا کمتر شود، حداکثر عمق حفره آبشستگی افزایش و یا کاهش می‌یابد. پکینگ و همکاران (۱۹۹۸) فشانه ریزشی به حوضچه‌ی مستهلک کننده را مورد

آزمایش قرار دادند. آن‌ها در مطالعه‌ی خود میزان کارمایه فشانه را در مقاطع مختلف نمایش داده، و در نهایت بازده استهلاک کارمایه حوضچه را به‌دست آوردند. بر طبق نظر آدریبیگ و راجاراتنام (۱۹۹۸) فرایند چرخشی، که باعث پر و خالی شدن حفره‌ی آبشستگی می‌شود موجب می‌گردد که ابعاد حفره‌ی آبشستگی به شرایط تعادل نرسد. آدوس (۲۰۰۴) به مطالعه‌ی آزمایشگاهی در مورد هیدرولیک فشانه، و آبشستگی ناشی از فشانه‌های مستغرق صفحه‌ای پرداخت. در این آزمایش با عکس‌برداری سعی شد تا توسعه‌ی آبشستگی ناشی از فشانه صفحه‌ای به تصویر کشیده شود، و به تبع آن زمان تعادل به‌خوبی قابل تشخیص باشد. در این مطالعه، هیدرولیک فشانه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت و نیمرخ عمقی سرعت در دو حالت بسترهای صلب و فرسایش‌پذیر به‌وسیله‌ی نیمرخ‌ساز مافوق صوت برداشت شد. جوی سوی (۲۰۰۸) به بررسی تاثیر عمق پایاب و عرض نهر بر الگوی آبشستگی به‌وسیله فشانه مربعی پرداخت، و به این نتیجه رسید، که با کاهش عمق پایاب و افزایش عرض نهر پایه‌دار، پهنای آبشستگی نیز افزوده می‌شود. احدیان و موسوی جهرمی (۲۰۰۹) خصوصیات هندسی خط سیر فشانه مستغرق را با افشانه‌های دایره‌ای و قطرهای متفاوت بررسی کرده و دریافتند که طول خط سیر با افزایش قطر از ۵ به ۸ میلی‌متر کاهش می‌یابد. ضمناً، مشاهدات آن‌ها حاکی از افزایش طول خط سیر با افزایش غلظت سیال فشانه بود. همچنین، عوامل موثر بر جریان فشانه‌های مستغرق در منابع آب پذیرنده ساکن را بررسی نمود و نتیجه گرفتند که، با افزایش زاویه همگرایی فشانه از ۱۵ درجه به ۹۰ درجه مقدار طول نهایی مرز بالایی خط سیر در حدود ۲۵ درصد، و مرز پایینی در حدود ۲۸ درصد، افزایش داشته است. مهرآئین (۲۰۱۱) به بررسی تاثیر فراسنج‌های مهمی مانند: سرعت فشانه، فاصله‌ی افقی فشانه از دیواره‌ی بالادست نهر پایه‌دار و عمق پایاب بر روی نیمرخ طولی آبشستگی پرداخت. منصوری نژاد (۲۰۱۳) به بررسی آبشستگی پایین دست فشانه‌های دایره‌ای، مربع، و مستطیل در سه بده (۱/۶، ۲ و ۲/۵)، و در سه رقوم ارتفاعی متفاوت پرداخت. نتایج نشان دهنده‌ی آن بود که بهترین عملکرد مربوط به فشانه مربعی و در حالت مماس بر بستر رخ می‌دهد. سلیمانی و همکاران (۲۰۱۳)، با ساختن شبیه آزمایشگاهی، در مورد رفتار افشانه‌های مستغرق مطالعه کردند. علاوه بر مطالعه‌ی تاثیر

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

راجاراتنام (۱۹۷۶) نشان داد که اگر مقدار عدد رینولدز از ۳۰۰۰ بیش تر باشد، تاثیر آن در ایجاد حفره آبستنگی متاثر از فشانه صفحه‌ای، قابل چشم پوشی است. در این تحقیق نیز با توجه به اینکه در تمامی آزمایش‌ها عدد رینولدز جریان فشانه در محدوده جریان متلاطم قرار گیرد، از عدد رینولدز صرف نظر شده است. بنابراین معادله ۳ نتیجه می‌گردد:

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

### نمونه‌ی فیزیکی

جهت انجام آزمایش‌ها نهر پایه‌دار آزمایشگاهی به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۶، ۱/۵ و ۱ متر در آزمایشگاه رسوب سازمان آب و برق خوزستان انتخاب گردید. ضمن اینکه از یک دستگاه اندازه‌گیری بده (جریان‌سنج) جهت مهار کردن بده ورودی به لوله چند راهه و دو تلمبه‌گریز از مرکز پشت سر هم که هر یک توان تامین بده و فشاری به ترتیب معادل ۲۰ تا ۱۰۰ لیتر بر دقیقه و ۲۵ تا ۳۵ متر را داشتند استفاده گردید. مطابق شکل ۲، افشانه به شکل دایره‌ای با قطر ۱ سانتی‌متر، مربعی با ابعاد ۰/۸۸۶ سانتی-متر، مستطیلی با ضلع بزرگ ۱/۷۷ سانتی‌متر و ضلع کوچک ۰/۴۴۳ سانتی‌متر و لوزی با ابعاد ۰/۸۸۶ سانتی‌متر از جنس آلومینیم ساخته شدند. همچنین، در بخش فشانه‌های مرکب، چیدمان با فواصل افقی متفاوت فشانه‌های منفرد در دو حالت با زاویه و بدون زاویه افقی بررسی شدند، که جهت تأمین زاویه از رابطه‌ها با سه زاویه ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه استفاده گردید. فشانه‌ها در رقوم بیست سانتی‌متری از کف نهر پایه‌دار کار گذاشته شده و تعداد ۵۲ آزمایش (پس از حذف آزمایش‌های تکراری) برای بده‌های مختلف ۱/۶، ۲، ۲/۵، و برای یک الگو ۳ متر مکعب بر ساعت نیز انجام گردید. الگوهای مختلف آزمایش‌ها مطابق جدول ۱ می‌باشند. پس از آبیگری نهر پایه‌دار به کمک دریچه‌ی کشویی انتهایی نهر پایه‌دار، و تنظیم رقوم ارتفاع آب در تراز ۵۰ سانتی‌متری بر روی رسوبات، و تامین عمق استغراق لازم بر روی افشانه، با تغییر بازشدگی شیر

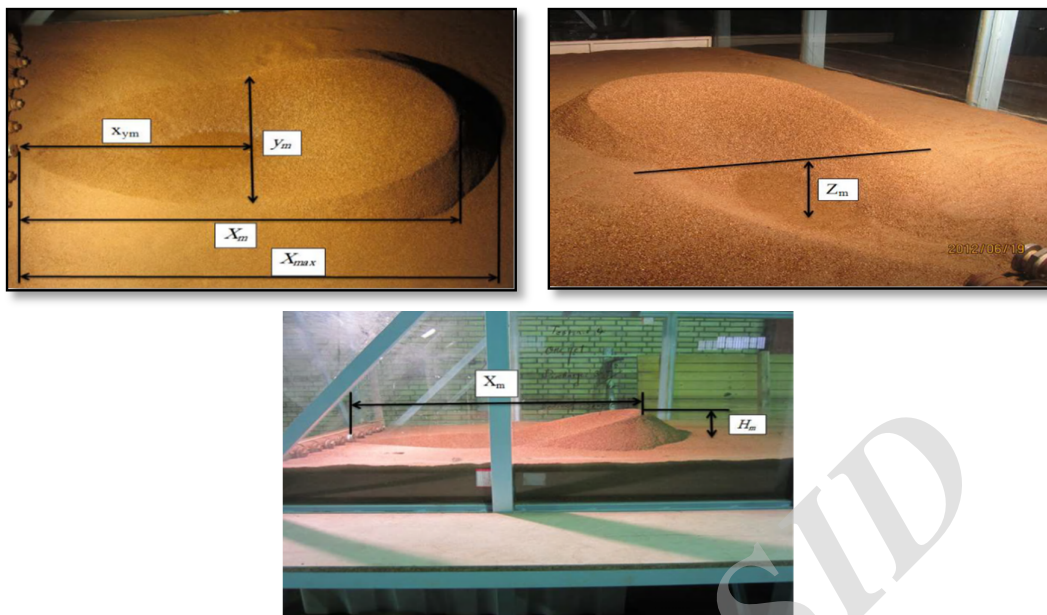
فشانه بر روی بستر فرسایش‌پذیر، مشخصه‌های آبی فشانه مستغرق را نیز برداشت نمودند. در این آزمایش‌ها از افشانه‌هایی با زاویه‌های داخلی مختلف (۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ درجه) استفاده شد. نتیجه‌ی آزمایش‌ها حاکی از آن بودند که با افزایش زاویه‌ی داخلی افشانه، فشانه حاصله سریع‌تر مستهلک می‌شود، اما در عین حال، عمق و طول آبستنگی نیز افزایش می‌یابد. لذا، در یک بده ثابت بیش‌ترین آبستنگی برای افشانه ۹۰ درجه مشاهده شد. جامع و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی الگوی آبستنگی ناشی از تغییر ارتفاع فشانه پرداختند. پاگلپارا و پالرمو (۲۰۱۳) به بررسی الگوی آبستنگی فشانه‌های مستغرق مایل، تحت تاثیر عواملی چون عمق پایاب، زاویه‌ی بین فشانه‌های مایل دوتایی و فاصله‌ی عمودی فشانه‌ها از سطح آب پایاب پرداخت.

### تحلیل ابعادی

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، فراسنج‌های اساسی در بررسی فشانه‌های مستغرق به فراسنج‌های هندسی افشانه، شدت جریان در آن و فراسنج‌های فیزیکی سیال پذیرنده دسته‌بندی می‌شوند. در تحلیل ابعادی با حذف جمله‌هایی که در این تحقیق ثابت فرض می‌شوند، و یا از تاثیر ناچیزی برخوردارند، می‌توان نوشت:

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

که  $U_0$  سرعت خروجی فشانه،  $\rho$  چگالی سیال فشانه،  $\mu$  لزجت پویایی،  $\Delta\rho = \rho_s - \rho$  اختلاف چگالی سیال با چگالی ذرات رسوبی،  $g$  شتاب ثقل،  $d_{95}$  قطر موثر ذرات رسوبی،  $\alpha$  زاویه‌ی میانی فشانه‌های مرکب نسبت به افق،  $\beta$  فراسنج شکل فشانه،  $d$  قطر بیرونی فشانه،  $L$  فاصله‌ی افقی میان فشانه‌های مرکب،  $x_{\max}$  حداکثر طول آبستنگی،  $y_m$  حداکثر عرض آبستنگی،  $x_{ym}$  طول متناسب با  $x_m, y_m$  حداکثر فاصله‌ی پشته رسوبی،  $z_m$  حداکثر عمق آبستنگی و  $h_m$  ارتفاع پشته‌ی رسوبی در اثر ترسیب می‌باشند که در شکل ۱، فراسنج‌های آبستنگی به صورت طرح‌واره نشان داده شده‌اند. از معادله‌ی ۱، فراسنج‌های بی‌بعد به صورت معادله‌ی ۲ می‌باشند:



شکل ۱- فراسنج‌های مختلف الگوی آبشستگی در تصویر مسطح و نیمرخ طولی مقابل فشانه.



شکل ۲- انواع فشانه‌ها.

جدول ۱- الگو آزمایش‌ها.

تعداد آزمایش‌ها	فراسنج مورد بررسی	نوع فشانه	بده خروجی (m <sup>3</sup> /h)	تعداد فشانه	الگو
۱۶	d=۱ cm	دایره	۱.۶	۱	۱
	۰.۸۸۶*۰/۸۸۶	مربع	۲		
	۱/۷۷*۰/۴۴۳	مستطیل	۲.۵		
	۰.۸۸۶*۰/۸۸۶	لوزی	۳		
۱۸	L=۱۱.۵ cm	دایره	۱.۶	۳	۲
	L=۲۳ cm	مربع	۲		
۱۲	L=۶ cm	مربع	۱.۶	۳	۳
	L=۱۱.۵ cm		۲		
	L=۱۸ cm		۲.۵		
	L=۲۳ cm		۲.۵		
۱۲	۳۰.	مربع	۱.۶	۳	۴
	۴۵.		۲		
	۶۰.		۲.۵		
	۹۰.		۲.۵		

افتاده است. همچنین، طبق تحقیقات حسینی و همکاران (۱۳۸۷)، قسمت اعظم آبشستگی در زمان‌های اولیه آزمایش رخ داده، سپس روند آبشستگی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است، به‌طوری‌که با گذشتن مدت زمان بیشتر، تغییرات زیادی در افزایش ابعاد آبشستگی ملاحظه نمی‌شود. لذا، با عنایت به تحقیقات گذشته و نتایج آزمایش‌ها تعادل در این تحقیق، ۱۵۰ دقیقه به‌عنوان زمان تعادل در آزمایش‌ها لحاظ گردیده است.

### نتایج و بحث

در این بخش، نیمرخ طولی آبشستگی رخ داده به‌صورت فراسنج‌های بی‌بعد  $z/d$  در مقابل  $x/d$  ترسیم گردید، که نتایج به‌طور اختصار برای هر الگو، و به ازای بده ۲/۵ متر مکعب بر ساعت، به قرار زیر می‌باشند:

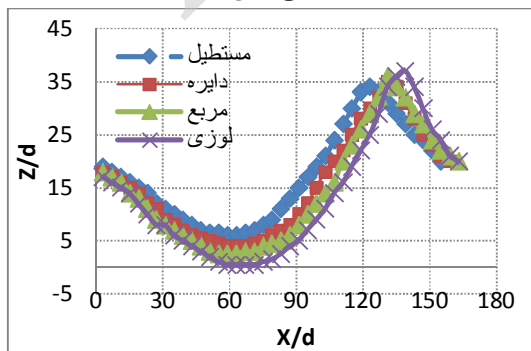
با توجه به نتایج آزمایش‌ها و شکل ۶، بهترین عملکرد از نظر توسعه‌ی آبشستگی برای فشانه منفرد، مربوط به فشانه لوزی شکل و بیش‌ترین بده، یعنی ۳ متر مکعب بر ساعت نتیجه شد، ولی با توجه به آن‌که در این بده

لوله تغذیه‌ی فشانه‌ها و قرائت مداوم جریان سنج، میزان بده افشانه تنظیم گردید. سپس و به مدت زمان تعیین شده، فشانه‌ها به‌طور مداوم روشن بوده و پس از آن به کمک دریچه انتهای نهر پایه‌دار و سامانه زهکش کف آن آب به صورت کامل تخلیه می‌شد. در این مرحله به‌وسیله ارابه‌ی سه بعدی، متر لیزری و صفحه‌ی مدرج بر روی ارابه، فراسنج‌های آبشستگی برای هر آزمایش اندازه‌گیری گردید. تصاویری از آزمایش‌ها انجام شده در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است.

در این تحقیق، برای به‌دست آوردن زمان تعادل، ۲۰ آزمایش مقدماتی انجام گردیدند. این ۲۰ آزمایش هر کدام به مدت ۶ ساعت، و در ۴ دبی مختلف، انجام شدند. مطابق شکل ۵، پس از گذشت ۱۵۰ دقیقه، تقریباً ۹۸٪ آبشستگی نسبت به زمان ۳۶۰ دقیقه اتفاق افتاد. بر طبق تحقیقات رنجبر و همکاران (۱۳۸۵) با مطالعه در مورد تغییرات زمانی حفره‌ی آبشستگی، نتیجه گرفته شد که حداکثر تغییرات در ابعاد حفره‌ی مزبور در دقایق اولیه رخ می‌دهند، و پس از آن، نرخ این تغییرات کاهش می‌یابد، به‌نحوی که پس از گذشتن ۸۰ دقیقه، تقریباً ۷۰٪ آبشستگی اتفاق



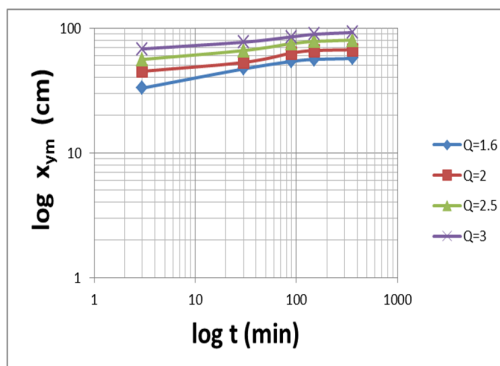
شکل ۴- الگوی آبشستگی ناشی از فشانه مرکب مایل با زاویه‌ی افقی میان فشانه‌ها



شکل ۶- الگوی ۱: نیمرخ طولی آبشستگی مقابل فشانه با شکل‌های مختلف به ازای بده  $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ .



شکل ۳- الگوی آبشستگی ناشی از فشانه مرکب در  $6 \text{ cm}$   $L=$



شکل ۵- نمودار لگاریتمی مربوط به آزمایش تعادل.

حالت‌های مختلف اقدام گردیده که روابط به صورت ذیل می‌باشند:

$$\frac{x_{\max}}{d} = 4.5 * Fr_d - 0.808 * L_i + 39.48 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.833$$

$$\frac{z_m}{d} = 0.458 * Fr_d - 0.268 * L_i + 8.127 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.949$$

$$\frac{y_m}{d} = 1.458 * Fr_d + 2.192 * L_i + 6.107 \quad (9)$$

$$R^2 = 0.957$$

شکل‌های ۷ و ۸ و روابط فوق نشان می‌دهند که با افزایش فاصله‌ی افقی میان فشانه‌ها، طول و عمق آبشستگی کمتر می‌گردد. در عوض، عرض آبشستگی با افزایش فاصله به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر بر اثر افزایش فاصله‌ی میان فشانه‌ها، بخش اعظم کاهش ابعاد آبشستگی، که مربوط به کاهش طول بوده، به‌وسیله افزایش عرض آبشستگی جبران شده است، به‌طوری‌که در ضرایب معادلات ۷، ۸ و ۹ نتیجه دیده می‌شوند این مطلب به خوبی نشان داده شده است که اثرپذیری تغییرات فراسنج‌های عرض آبشستگی از فاصله‌ی میان فشانه‌ها، به‌ترتیب حدود ۲/۷ و ۸ برابر مقدار اثرپذیری فراسنج‌های طول و عمق آبشستگی است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، در مواردی که هدف افزایش عمقی یا طولی آبشستگی باشد، استفاده از فشانه منفرد بهتر از فشانه مرکب بوده، در حالی‌که برای افزایش در صفحه‌ی آبشستگی، استفاده از فشانه‌های مرکب توصیه می‌شود.

همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش عدد فرود دنسیومتری، کلیه ابعاد آبشستگی توسعه‌ی بیش‌تری می‌یابند. البته، با توجه به روابط، تأثیر عدد فرود دنسیومتری فشانه‌ها بر طول آبشستگی نسبت به عرض و عمق آبشستگی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر است. با توجه به شکل ۹، بهترین عملکرد از نظر فراسنج‌های آبشستگی مربوط به کم‌ترین فاصله، یعنی ۶ سانتی‌متر و بیش‌ترین بده، یعنی ۲/۵ متر مکعب بر ساعت می‌باشد. طبق این نتایج، هر چه فاصله‌ی میان فشانه‌ها بیش‌تر شود، ابعاد آبشستگی کاهش می‌یابد. البته این اختلاف به‌طور چشمگیری در فاصله‌ی ۶ سانتی‌متری قابل مشاهده بوده، و این نرخ در بقیه‌ی فواصل کاهش یافته و کمتر می‌شود.

آبشستگی فشانه لوزی شکل به کف نهر پایه‌دار برخورد نموده و به‌صورت دوبعدی گردید، لذا ملاک بررسی بده ۲.۵ متر مکعب بر ساعت در نظر گرفته شده است. در تمامی نتایج مشاهده گردید که با افزایش عدد فرود دنسیومتری، الگوی آبشستگی توسعه‌ی بیش‌تری می‌یابد. توسعه‌ی الگوی آبشستگی برای فشانه منفرد، به ترتیب از کم‌ترین به بیش‌ترین مقدار مربوط به فشانه مستطیلی، دایره‌ای، مربعی، و سپس لوزی شکل نتیجه شد. همچنین، فراسنج‌های حداکثر عمق، عرض و طول بی‌بعد الگوی آبشستگی مربوط به فشانه لوزی شکل با بالاترین بازده، یعنی بده ۲.۵ متر مکعب بر ساعت، به‌ترتیب ۱۹/۵، ۶۹ و ۱۶۳ به‌دست آمد.

طبق نتیجه‌گیری منصورینژاد (۲۰۱۳)، از میان فشانه‌های مستطیلی، دایره و مربع در ۳ بده آزمایش شده، بیش‌ترین توسعه‌ی آبشستگی مربوط به فشانه شکل مربع بوده، که در تحقیق حاضر با آزمایش فشانه لوزی شکل در بده‌های بیش‌تر مشاهده شد، که این فشانه از بازده بیش‌تری در توسعه‌ی الگوی آبشستگی برخوردار است.

با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، بهترین عملکرد از نظر فراسنج‌های آبشستگی فشانه‌های مرکب، مربوط به فشانه مربع، سپس با اختلاف بسیار کمی، فشانه لوزی شکل، و پس از آن فشانه دایره‌ای می‌باشد، که از میان تمام آزمایش‌ها این الگو، بهترین عملکرد از لحاظ توسعه‌ی آبشستگی مربوط به بیش‌ترین بده، یعنی ۲/۵ متر مکعب بر ساعت، و فاصله‌ی افقی ۱۱/۵ سانتی‌متر می‌باشد.

در حالت چیدمان مرکب، الگوی آبشستگی با تغییر شکل فشانه، مخصوصاً در حالت فشانه لوزی و مربع شکل، چندان تغییر نکرده است، این در حالی است که با توجه به شکل ۶ در چیدمان تکی فشانه‌ها، فراسنج شکل موثر بوده است. به‌عبارت دیگر، نتیجه می‌شود در حالت استفاده از چیدمان مرکب فشانه‌ها، فراسنج شکل فشانه نمی‌تواند به عنوان عاملی تأثیرگذار در تغییر الگوی آبشستگی مطرح شود. همچنین، فراسنج‌های حداکثر عمق، عرض و طول بی‌بعد الگوی آبشستگی مربوط به فشانه مربع با بالاترین بازده در بده ۲/۵ متر مکعب بر ساعت و در فاصله افقی ۱۱/۵ سانتی‌متر، به ترتیب ۱۲، ۵۲ و ۱۰۳ به‌دست آمد.

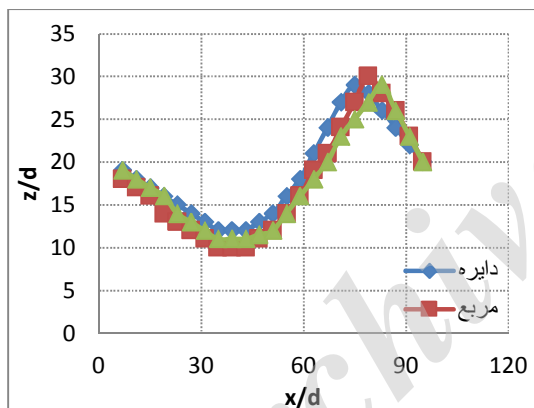
با استفاده از نرم‌افزار SPSS، نسبت به استخراج ضرایب معادله‌ی پیشنهادی برای الگوی آبشستگی فشانه در

نتایج این الگو از تحقیق حاضر، مشاهده گردید که روند کاهش طول و عمق آبستگی در فشانه مربع شکل با انجام آزمایش در طیف بیش تری از فواصل افقی (۴ فاصله) نیز رخ می دهد، به شکلی که کاهش طول و عمق در فواصل افقی کم مشاهده گردیده و هر چه فاصله ی افقی میان فشانه های مرکب بیش تر گردد، نیمرخ الگوهای آبستگی تشکیل شده مقابل فشانه ها تقریباً منطبق بر هم می گردند. همچنین، فراسنج های حداکثر عمق، عرض و طول بی بعد الگوی آبستگی مربوط به فشانه مرکب با فاصله ی ۶ سانتی متر با بالاترین بازده در بده  $2/5$  متر مکعب بر ساعت، به ترتیب ۱۵، ۴۹ و ۱۲۲ به دست آمد.

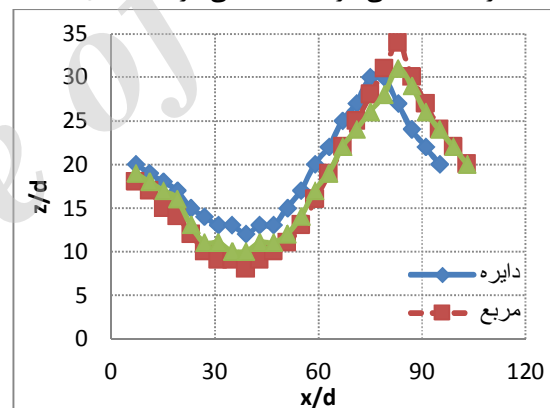
شکل ۱۰ توسعه ی آبستگی را برای زوایای مختلف فشانه های مرکب نشان می دهد. با توجه به نتایج آزمایش ها در شکل ۱۰، بهترین عملکرد از نظر توسعه ی آبستگی مربوط به بیش ترین زاویه ی  $(\alpha)$ ، ۹۰ درجه در بیش ترین

به این معنی، که به ازای فواصل افقی بیش تر میان فشانه های مرکب سه تایی، بیش ترین تغییرات الگوی آبستگی در تصویر مسطح آبستگی (یعنی در دو فراسنج طول و عرض) خود را نشان می دهد تا در عمق آبستگی.

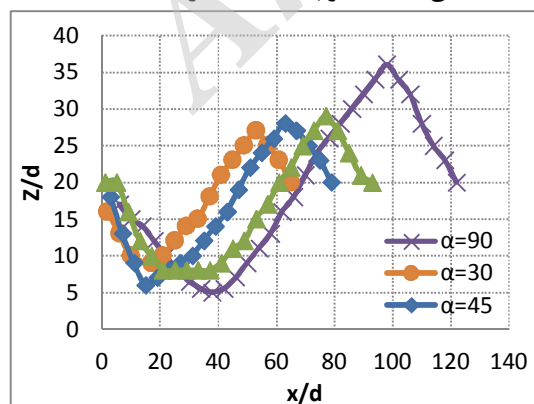
با توجه به اینکه هدف سناریوی حاضر مقایسه ی الگوهای آبستگی مقابل فشانه منفرد و فشانه مرکب با بده مصرف شده ی ثابت برای هر دو نوع چیدمان بوده است، مشاهده گردید که تفاوت الگوی آبستگی مقابل فشانه مرکب نسبت به فشانه منفرد به مراتب بیش تر از مقادیر آزمایش شده در تحقیق سلیمانی و همکاران (۲۰۱۳) بوده، که در آن الگوی آبستگی فشانه مرکب دایره ای با فاصله ی  $11/5$  سانتی متری تقریباً منطبق بر الگوی آبستگی فشانه منفرد با بده خروجی ۳ برابر منتج گردیده است. همچنین، طبق تحقیق سلیمانی و همکاران (۲۰۱۳)، مبنی بر اثرپذیری کم الگوی آبستگی فشانه مرکب با افزایش فاصله ی فشانه ها از  $11/5$  سانتی متر به ۲۳ سانتی متر، مقایسه ی با



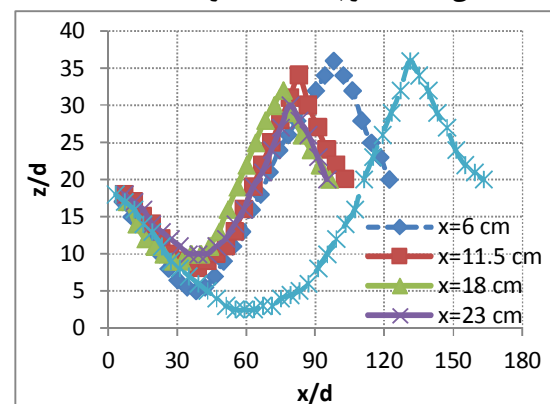
شکل ۸- الگو ۲: نیمرخ طولی آبستگی فشانه با شکل های مختلف در بده  $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$  و  $L=23 \text{ cm}$ .



شکل ۷- الگوی ۲: نیمرخ طولی آبستگی فشانه با شکل های مختلف در بده  $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$  و  $L=11.5 \text{ cm}$ .



شکل ۱۰- الگو ۴: نیمرخ طولی آبستگی ناشی از زوایای افقی مختلف فشانه های مرکب مایل در بده  $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ .



شکل ۹- الگو ۳: نیمرخ طولی آبستگی مقابل فشانه مرکب با فواصل افقی متفاوت و فشانه منفرد مربعی در بده  $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ .

مقادیری اثر کاهشی بیش‌تری را در مقایسه با ترکیب دوتایی از این نوع فشانه‌ها ایجاد می‌کند.

### نتیجه‌گیری

۱- در کلیه آزمایش‌ها، با بیش‌تر شدن بده، جریان نیم‌رخ آبستگی پایین دست فشانه افزایش یافت.

۲- با تغییر در شکل فشانه‌های منفرد، بیشترین به کم‌ترین توسعه‌ی الگوی آبستگی، به ترتیب در فشانه‌های لوزی، مربع، دایره و مستطیل رخ داد.

۳- فراسنج شکل فشانه در چیدمان مرکب فشانه‌ها، عاملی تأثیرگذاری نبوده، در حالی که میزان تأثیر این فراسنج در چیدمان منفرد بیش‌تر است. به طوری که فشانه لوزی شکل بهترین عملکرد را در میان سایر شکل‌های در حالت منفرد دارد، ولی در حالت مرکب، اثری را تقریباً مشابه با فشانه مربع شکل (و هر دو بیش‌تر از دایره‌ای شکل) نشان می‌دهد.

۴- در بده ثابت، چیدمان مرکب فشانه‌ها الگوی آبستگی کم‌تری را نسبت به چیدمان منفرد از خود نشان می‌دهد. افزایش فاصله‌ی افقی میان فشانه‌های مرکب تنها منجر به توسعه‌ی عرضی آبستگی می‌گردد.

۵- هرچه زاویه‌ی میانی فشانه‌های مرکب کاهش یابد، الگوی آبستگی کوچک‌تر خواهد شد. به طوری که در حالت فشانه مرکب مستقیم (زاویه‌ی میانی ۹۰ درجه)، الگوی آبستگی توسعه‌ی بیش‌تری را دارد.

به‌طور کلی، به‌منظور افزایش کلی ابعاد آبستگی، از فشانه‌های منفرد و با شکل سطح مقطع لوزی، و به‌منظور کاهش کلی ابعاد آبستگی، فشانه‌های با چیدمان مرکب که کم‌ترین زاویه میانی افقی ممکن را دارا باشند، به‌کار برده شوند. همچنین، به‌منظور توسعه‌ی عرضی آبستگی، از چیدمان فشانه‌های مرکب، بدون اعمال زاویه‌ی افقی استفاده گردد. نتایج فوق می‌توانند جهت تعیین بهینه‌ترین حالت کاربرد فشانه‌ها در اهداف مختلف صنعت به‌کار گرفته شوند.

### سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله از سازمان آب و برق استان خوزستان به جهت امکان استفاده از آزمایشگاه و حمایت‌های مالی جهت انجام تحقیق حاضر، سپاسگزاری می‌نمایند.

بده یعنی ۲/۵ متر مکعب بر ساعت بوده، و همین‌طور، کم‌ترین توسعه‌ی آبستگی مربوط به فشانه با کم‌ترین زاویه، ۳۰ درجه و کم‌ترین بده،  $1.6 \text{ m}^3/\text{hr}$  بوده است.

با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسبت به استخراج ضرایب معادله پیشنهادی برای الگوی آبستگی فشانه به‌عنوان تابعی از عدد فرود دنسیومتریک و فراسنج  $a=180-2a$ ، در حالت‌های مختلف اقدام گردید:

$$\frac{x_{\max}}{d} = 4 * Fr_d - 20.546 * a + 45.943 \quad (10)$$

$$R^2 = 0.945$$

$$\frac{z_m}{d} = 0.542 * Fr_d - 1.338 * a + 5.450 \quad (11)$$

$$R^2 = 0.727$$

$$\frac{y_m}{d} = 2.208 * Fr_d - 6.752 * a + 12.617 \quad (12)$$

$$R^2 = 0.942$$

با مقایسه شکل‌های ۷ الی ۱۱، و روابط ۱۰ الی ۱۲، مشاهده می‌شود که علاوه بر روند افزایشی ابعاد آبستگی، فشانه‌ها با افزایش عدد فرود دنسیومتریک، با افزایش زاویه-ی افقی میان فشانه‌ها، نیز ابعاد آبستگی افزایش می‌یابد (البته به جز زاویه‌ی ۴۵ درجه که مقادیر بیش‌تری را در فراسنج عمق نسبت به فشانه با زاویه‌ی ۶۰ درجه از خود نشان داد). همچنین، با مقایسه‌ی حالت ۹۰ درجه (فشانه مستقیم) با حالت‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه (مایل)، مشاهده شد که بیش‌ترین اثر آبستگی ناشی از فشانه‌های مرکب مایل، به‌طور عمده در عمق و پس از آن در عرض و طول نمایان گردیده است. فراسنج‌های الگوی آبستگی مربوط به فشانه مرکب مایل با زاویه‌ی ۶۰ درجه، بعد از فشانه مرکب مستقیم (زاویه افقی ۹۰ درجه)، بالاترین بازده را در بده ۲/۵ متر مکعب بر ساعت دارا بوده است.

با توجه به مقایسه‌ی نتیجه تحقیق پآگلاریا و پالرمو (۲۰۱۳) در خصوص آبستگی مقابل فشانه‌های مرکب دوتایی مایل در زوایای افقی ۳۰، ۵۲/۵ و ۷۵ درجه، مبنی بر کاهش الگوی آبستگی با کاهش زاویه، با نتیجه این الگو از تحقیق حاضر، مشاهده شده است که الگوی آبستگی در فشانه‌های سه تایی مرکب مایل هم همین روند کاهشی را دنبال می‌کنند. همچنین، به‌طور کلی می‌توان عنوان کرد که نسبت به فشانه‌های منفرد، ترکیب سه تایی فشانه‌های مایل با توجه به تداخل بیش‌تر کارمایه،



- 14) Rajaramam. 1976. Turbulent Jets. Amsterdam: Elsevier Sc. Publ. Co.
- 15) Soleimani Babarsad M, Musavi Jahromi H, Kashkooli H, Vali Samani HM and Sedghi H. 2013. Experimental study of maximum velocity and effective length in submerged jet. Indian Journal of Science and Technology. 6(1)

## منابع

- ۱) احدیان، ج. ۱۳۸۸. تاثیر زاویه همگرایی بر طول اختلاط در فشانه‌های مستغرق با استفاده از شبیه فیزیکی و ریاضی، رساله دکترا، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.
- ۲) حسینی، پ، ابراهیمی، ک، صناعی، م، و مشعل، م. ۱۳۸۷. بررسی تغییرات زمانی نیمرخ آبشستگی پائین‌دست فشانه 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 قدسیان، م. ۱۳۸۵. تغییرات زمانی حفره آبشستگی پائین‌دست جت‌های ریزشی آزاد. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. اهواز، سازمان آب و برق خوزستان، دانشگاه شهید چمران.
- 4) Adduce, C. 2004. Local scour by submerged turbulent jets. *Advances in Hydro-Science and Engineering and Vol VI*
- 5) Aderibigbe, O. Rajaratnam, N. 1998. Effect of Sediment gradation on erosion by plane turbulent wall jets. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE and 124(10):1034-1042*
- 6) Ahadiyan J, and Musavi Jahromi, N. 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 Lim S.Y. 1986. Local scour caused by submerged wall jet. *Proc. Instn Civ. Engrs.2(81):607-645*
- 8) Jame M, Ahadian J and Solimani Babarsad M.. 2013. Experimental study of scouring pattern due to circular submerged jets in shallow ambient fluid. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, 103-108*
- 9) Jueyi Sui. 2008. Influence of channel width and tailwater depth on local scour caused by square jets. *Journal of Hydro-environment Research. 39-45*
- 10) Mansouri Nezhad M. 2013. Experimental study of longitudinal velocity gradient in submerged hydraulic jet. *AENSI Journals of Advances in Environmental Biology, 4873-4878*
- 11) Mehraein M. 2011. Experimental study on scour due to simultaneous wall and impinging circular jet. *Hydraulics Conference, Hydrology & Water Resources Symposium, IAHR World Congress - Balance and Uncertainty.*
- 12) Pagliara, S. and Palermo, M. 2013. Analysis of scour characteristics in the presence of aerated crossing jets. *Australian Journal of Water Resources. 16(2)*
- 13) Peiqing L, Jizhang G. and Yongmei L. 1998. Experimental investigation of submerged impinging jets in a plunge pool downstream of large dams. *Science in China (Series E). 41(4)*