

# آبشستگی موضعی ناشی از جت های دیواره ای سه بعدی

حسین هلاوات ناصریان کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

E-mail: Honaserian@yahoo.com

## چکیده

این مطالعه بر روی آبشستگی موضعی ناشی از جت های دیواره ای سه بعدی وارد کننده جریان اطراف با نسبت عمق پایاب (عمق پایاب به عرض نازل) متغیر از ۱ تا ۱۸ متمرکز شده است. سه عدد فرود دانسی متریک (F0=3/9, 6/6, 10) برقرار شدند. دو نوع مختلف ماسه یکنواخت جهت فهمیدن اثر اندازه ذره مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج ارائه شده در اینجا بر اساس مشاهدات بصری تفصیلی ارزیابی هندسه آبشستگی و الگوهای جریان می باشند. نتایج نشان می دهند که عمق پایاب در حالات پایاب کم بر هندسه آبشستگی موثر است، اما در حالات پایاب بیشتر، معلوم گردید که این اثر کاهش می یابد.

## ۱- مقدمه

وقوع آبشستگی موضعی ناشی از جت های دیواره ای آشفته را می توان در پایین دست یک دریچه، سایر تخلیه کننده ها در سدها، تخلیه کننده های کالورت و حوضچه های آرامش مشاهده نمود. نقش پروفسور Rajaratnam در این زمینه بخوبی شناخته شده است

Rajaratnam & Berry 1977; Rajaratnam & Diebel 1981; Ade & Rajaratnam 1998

بمنظور درک بهتر فرآیند آبشستگی، وضعیت های مختلف جت در اندرکنش با بسترهای ماسه ای توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. آبشستگی ناشی از جت های دیواره ای سه بعدی به گستردگی آبشستگی ناشی از جت دیواره ای مسطح تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. (Rajaratnam & Berry (1977 آبشستگی ناشی از جت های دیواره ای دایره ای در اندرکنش با بسترهای فرسایش پذیر ماسه ای و پلی استیرن را برای هر دو نوع جت هوایی و آبی مورد مطالعه قرار دادند

و نتیجه گرفتند که ابعاد هندسی اصلی حفره آبشستگی تابعی از عدد فرود دانسی متریک (F0) می باشند. Rajaratnam & Diebel (1977) با استفاده از وسایل آزمایشگاهی مشابهی، آزمایشهایی را با اعماق پایاب کم انجام دادند. آنها مشاهده نمودند که برآمدگی در اعماق پایاب کم، مسطح خواهد شد. آنها نتیجه گرفتند که عمق پایاب نسبی و عرض نسبی کانال پایین دست، عمق بیشینه آبشستگی را تحت تأثیر قرار نمی دهد. (Ali & Lim (1986 ملاحظه نمودند که پایاب بر عمق بیشینه آبشستگی در حالات مجانب مؤثر می باشد. آنها همچنین یک حالت پایاب بحرانی را مشخص نمودند که در مقادیر بیش از آن کاهش یا افزایش در پایاب موجب افزایش در عمق بیشینه آبشستگی می شود و اثر پایاب وقتی  $H/b0$  بیش از ۱۶ گردد، ناچیز می شود. (Lim (1995 اثر عرض کانال (نسبت توسعه) بر گسترش آبشستگی را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده نمودند هنگامیکه نسبت توسعه ۱۰ یا بیشتر است، اعماق آبشستگی تحت تأثیر قرار نمی گیرند. (Ade & Rajaratnam (1998 داده های ۱۳ منبع مختلف را جمع آوری نمودند و سپس عدد فرود دانسی متریک (F0) را بعنوان یک پارامتر مشخصه جهت توصیف پروفیل آبشستگی، مشخص نمودند. آنها متذکر شدند که برای  $F0 > 10$ ، عمق پایاب اثر مشخصی بر عمق آبشستگی مجانب دارد. (Faruque و همکاران (۲۰۰۴) اثر عمق پایاب بر آبشستگی موضعی توسط جت های دیواره ای را با استفاده از یک نازل مربعی ۷۶ میلیمتری مورد مطالعه قرار دادند. داده های آنها نشان می دهد که عمق آبشستگی بیشینه در یک حالت استغراق کمتر میل به بزرگتر شدن دارد. آنها یک سری از پارامترها مشتمل بر اندازه نازل، اندازه ذره ماسه و عدد فرود دانسی متریک

را جهت مقیاس نمودن صحیح پارامترهای آبهستگی پیشنهاد نمودند. در نهایت، آنها نتیجه گرفتند که عدد فرود دانسی متریک، عمق پایاب و نسبت اندازه ذره به اندازه نازل، همگی بر گسترش آبهستگی ناشی از جت های سه بعدی مؤثرند، اما هر پارامتر اثر غالبی در حالات جریان مختلف دارد.

یک بازنگری مقاله حاضر نشان می دهد که اثرات عمق پایاب، اندازه نازل، نسبت پخشیدگی جت و اندازه ذره بایستی در آینده مشخص گردد. در این مقاله کوششی جهت درک بهتر فرآیند آبهستگی شدن سه بعدی صورت گرفته است.

## ۲- وسایل آزمایشگاهی و اندازه گیری ها

آزمایشات در یک فلوم کانال روباز مستطیلی در محل دانشگاه Windsor انجام گرفتند. طول فلوم ۸ متر، عرض آن ۱/۱ متر و عمق آن ۰/۹۲ متر بود. دیواره های فلوم از شیشه آبداده شفاف ساخته شده بود، که امکان دسترسی بصری برای اندازه گیری سرعت با استفاده از

سرعت سنج لیزر داپلر (LDA) را فراهم می نمود. شیب کف فلوم قابل تنظیم بود و برای این تحقیق، بصورت افقی نگاه داشته شده بود. یک بستر ماسه ای، ۳ متر طول برای ماسه درشت تر و ۲ متر طول برای ماسه ریزتر و ۰/۳۲۵ متر عمق، درون فلوم آماده شد و تا ورودی نازل ترازبندی گردید. یک ماسه گیر در فاصله ۱/۵ متری پایین دست انتهای بستر ماسه ای به منظور جلوگیری از رسیدن ماسه به دستگاه پمپ قرار داده شد. یک شاخص مدرج دیجیتال با دقت  $\pm 0.1$  میلیمتر بر روی یک سیستم عرضی جهت تهیه پروفیل های آبهستگی نصب گردید. نازل در نزدیکی انتهای بالادست فلوم جایگذاری شد. تنظیم کننده جریان در محل ورودی نازل جهت کاهش آبهستگی بکار گرفته شد. خروجی نازل مربعی  $26.6\text{mm} \times 26.6\text{mm}$  بود، که انقباض سطح مقطع نازل ۱۳۱:۱ را فراهم می نمود. نسبت عرض کانال به عرض نازل ۴۱/۳ بود، که بسیار بیشتر از مقدار پیشنهادی جهت جلوگیری از اثرات دیواره جانبی می باشد. دو نوع ماسه بکنواخت در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفت.

تعداد آزمایشات	$U_0$ (m/s)	$F_0$	$d_{50}$ (mm)	$\sigma_g$	$b_0$ (mm)	$H/b_0$	زمان (هر آزمایش)
۸	۰/۷۸	۳/۹	۲/۴۶	۱/۲۴	۲۶/۶	۱۸, ۱۵, ۱۲, ۶, ۴, ۳, ۲, ۱	۲۴
۸	۱/۳۱	۶/۶	۲/۴۶	۱/۲۴	۲۶/۶	۱۸, ۱۵, ۱۲, ۶, ۴, ۳, ۲, ۱	۲۴
۸	۲	۱۰	۲/۴۶	۱/۲۴	۲۶/۶	۱۸, ۱۵, ۱۲, ۶, ۴, ۳, ۲, ۱	۲۴
۴	۱/۰۸	۱۰	۰/۷۱	۰/۹۱	۲۶/۶	۱۸, ۶, ۴, ۲	۹۶

جدول ۱. جزئیات آزمایش

جزئیات آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

## ۱- نتایج

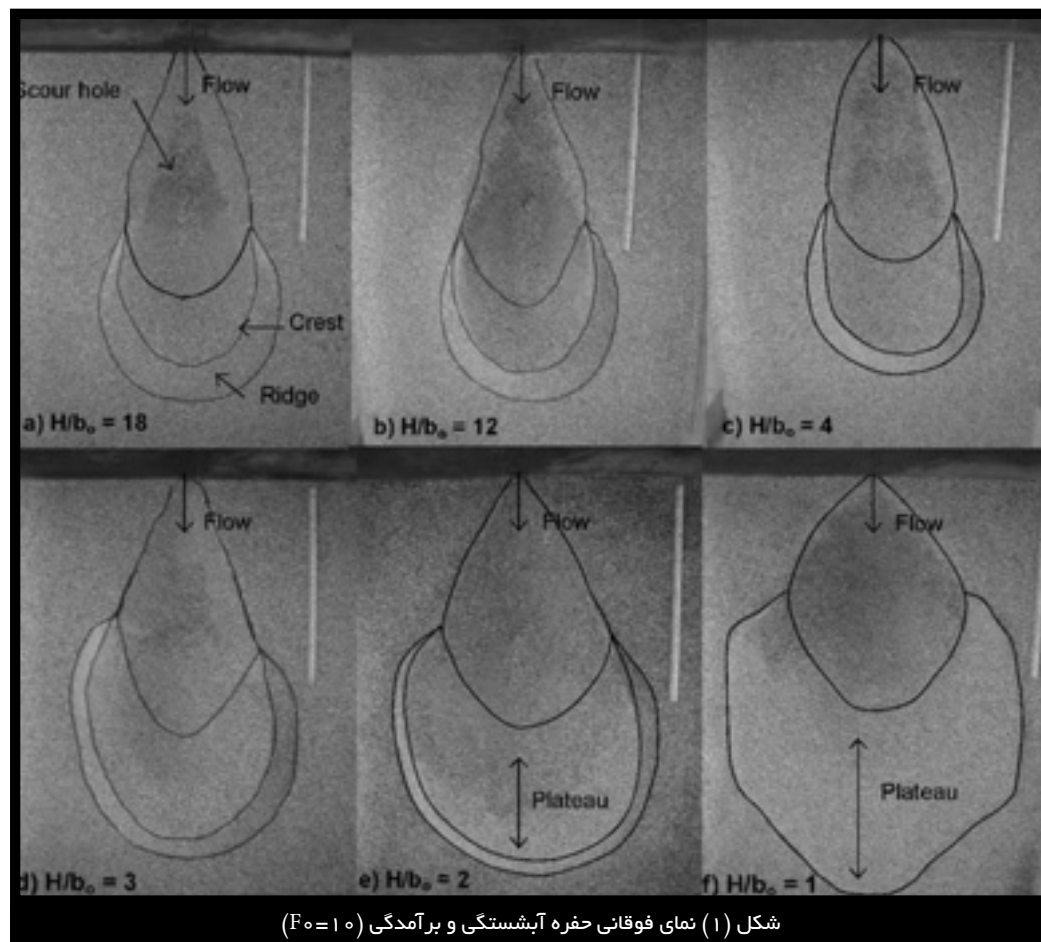
### ۳-۱ مشاهدات بصری

یک توصیف کلی از فرآیند آبهستگی مشاهداتی در هنگام آزمایش در اینجا ارائه شده است. بمنظور روشن شدن مطلب در ابتدا مشاهدات بصری مربوط به آزمایش با  $d_{50} = 2/46\text{mm}$  و  $H/b_0 = 18$  در  $F_0 = 10$  ارائه شده است. تغییرات از این حالت در سایر حالات جریان سپس تشریح می گردد. هنگامیکه پمپ روشن می شود، عمل آبهستگی شدیدی در نزدیکی نازل رخ داده و حفره ای تشکیل می دهد. در مراحل اولیه از فرآیند آبهستگی،

حفره آبهستگی بیضوی [با جابه جایی برآمدگی تشکیل شده در پایین دست حفره آبهستگی] بصورت طولی گسترش می یابد. برآمدگی تازه تشکیل شده، با حرکت چرخشی ذرات ماسه و با گذشت زمان، به سمت جلو حرکت می کند و اندازه برآمدگی بزرگتر می شود. ذراتی که پیش از این به نوک برآمدگی رسیده بودند، در شیب پایین دست برآمدگی به سمت پایین می لغزند. برای پایاب زیاد، در هیچ نقطه ای مقیاس زیادی ذرات ماسه معلق درون جریان وجود ندارد. گاهی اوقات، در مراحل ابتدایی آزمایش، پرتاب شدن ذرات از ناحیه مجاور بستر به درون ناحیه با سرعت سیال بیشتر را می توان مشاهده نمود. در طول زمان، اندازه حفره آبهستگی

تصاویر رنگی سرعت بیشتر در بخش بالایی برآمدگی را در مقایسه با سایر اعماق پایاب نشان می‌دهد. در نتیجه، هنگامیکه جریان تنش برشی کافی جهت جابه‌جایی بیشتر ذرات ماسه بر روی برآمدگی اعمال نماید، برآمدگی تمایل به صاف شدن دارد. بعلاوه، در اعماق پایاب کمتر، حفره آبشستگی و برآمدگی غیرمتقارن می‌شوند. مشاهده شد که این حالت غیرمتقارن در آزمایشات با اعداد فرود دانسی متریک ( $F_0$ ) کمتر نیز اتفاق می‌افتد. در اعماق پایاب کمتر، جت در ابتدا تمایل به حرکت جانبی به یک طرف داشت. اما با گذشت زمان جریان میل به متقارن شدن حول محور نازل دارد و حفره آبشستگی و برآمدگی در واکنش به جابه‌جایی جت تغییر می‌نماید. Faruque و همکاران (۲۰۰۴) وجود دو برآمدگی ثانویه بر روی هر دو طرف برآمدگی اصلی در آزمایشات با یک نازل با اندازه بزرگتر ( $b_0=76\text{mm}$ ) در  $H/b_0=2$  گزارش نمودند، که

و برآمدگی گسترش می‌یابد و برآمدگی در جهت جریان جابه‌جا می‌شود. برای اندازه ذره بزرگتر، پس از حدود ۱۵ ساعت از شروع آزمایش، موضع آبشستگی به حالت مجانب می‌رسد. شکل ۱ یک نمایش تصویری از نمای فوقانی حفره آبشستگی و برآمدگی مجانب در اعماق پایاب مختلف در  $F_0=10$  را نشان می‌دهد. در اعماق پایاب بیشتر ( $H/b_0 \geq 4$ )، حفره آبشستگی و برآمدگی حول محور نازل تقریباً متقارن می‌باشند (شکل ۱a تا ۱c). با کاهش عمق پایاب ( $H/b_0 < 3$ )، تاج برآمدگی ناپدید شده و روی برآمدگی سطح صافی شکل می‌گیرد (شکل ۱e و ۱f). هنگامیکه جت با حرکت عمودی خود با فشار خارج می‌شود، بطور آزادانه تری در جهت جانبی گسترش یافته، باعث ایجاد حفره ای با اندازه ای بزرگتر در این جهت می‌گردد. در نتیجه برآمدگی نیز بطور جانبی تری در  $H/b_0$  کمتر، گسترش می‌یابد.

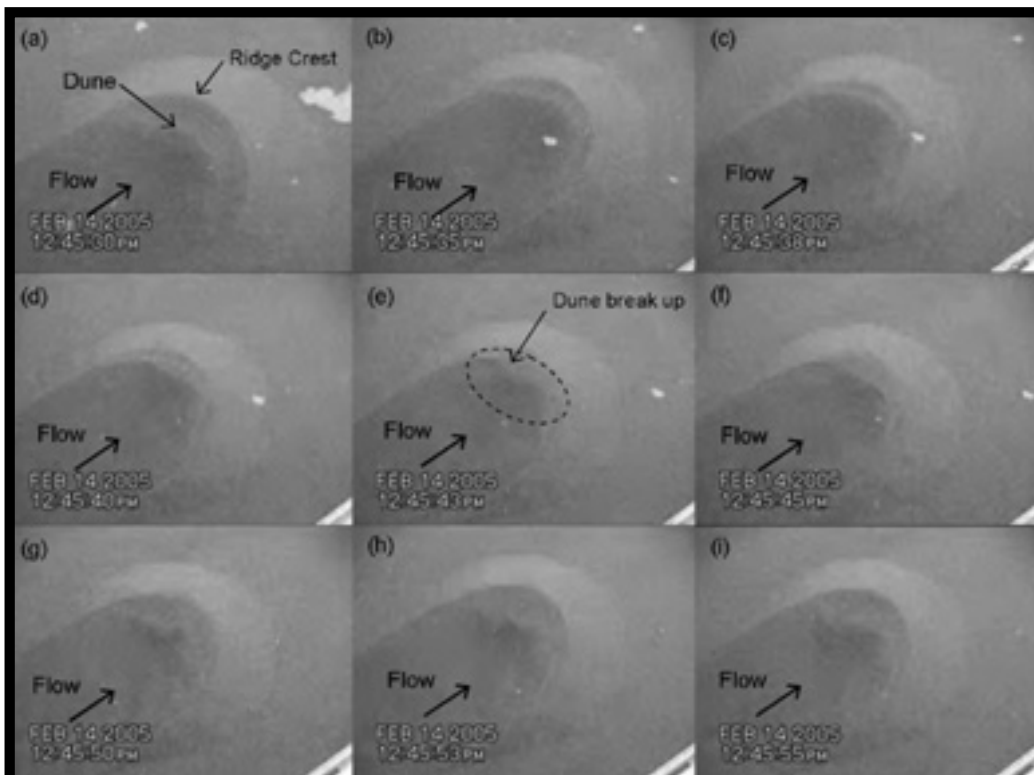


شکل (۱) نمای فوقانی حفره آبشستگی و برآمدگی ( $F_0=10$ )

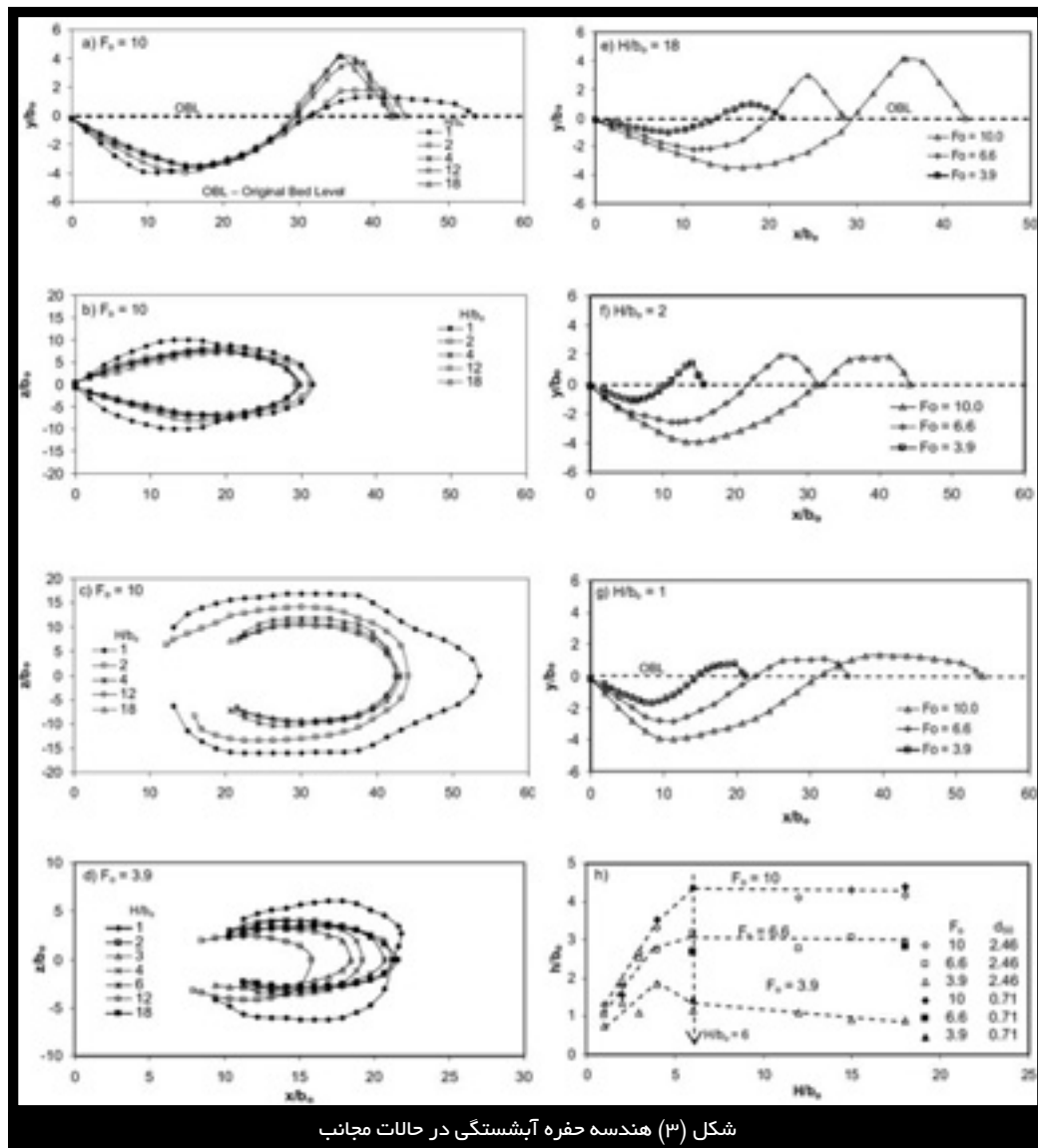
این مسئله تأثیر نسبت پخشیدگی جت ( $B/b_0$ ) را خاطر نشان می نمود. اما در پژوهش حاضر هیچ برآمدگی ثانویه روی هر یک از طرفین برآمدگی اصلی مشاهده نگردید. در مطالعه آنها، نسبت پخشیدگی جت  $14/5$  بود، در حالیکه در مطالعه اخیر، این مقدار  $14/3$  می باشد.

مشاهدات بصری همچنین وجود جوشش های متلاطم را نشان می دهد که متعاقباً در ناحیه پایین دست عمق بیشینه حفره آبشستگی رخ می دهد. تعداد کمی جوشش پراکنده نیز در ناحیه بالادست عمق بیشینه حفره آبشستگی مشاهده گردید. برای آزمایشات با ماسه بزرگتر ( $d_{50}=2.46\text{mm}$ )، جوشش های متلاطم نقش قابل توجهی در انتقال رسوب بازی نمی کنند. جوشش جهت حمل ذرات بزرگتر به اندازه کافی قوی نبود و فقط حرکت جارو کننده ذرات ریزتر رخ می داد. اما برای آزمایشات با ماسه ریزتر ( $d_{50}=0.71\text{mm}$ )، تکرار جوشش های متلاطم بیشتر بود و بطور بصری بنظر می رسید که نقش قابل توجهی در انتقال رسوب بازی می کند. علاوه بر گسترش طولی حفره آبشستگی و تشکیل برآمدگی، در شروع آزمایش

و پس از برآمدگی برخی ذرات بصورت بار معلق جابه جا و ته نشین می شدند و بستری ریپل مانند پس از برآمدگی تشکیل داده می شد. اما با گذشت زمان حفره آبشستگی و برآمدگی، بستر ناهموار را پوشش می دادند. پس از تشکیل برآمدگی، یک دیون کوچک با یک انحنای جانبی در شیب بالادست برآمدگی تشکیل می شد (شکل ۲a را ببیند). در طول زمان، این دیون به سمت تاج منتقل می شود (شکل ۲b و ۲c). طولی نمی کشد که دومین دیون تشکیل شده و با گذشت زمان، سلسله ای از دیون ها به آرامی به سمت بالای برآمدگی منتقل شده و تاج را از مسیر منحرف می نمایند. پس می توان گفت بخشی از دیون شکسته شده (شکل ۲e) و برآمدگی را به سمت پایین و بطرف حفره آبشستگی می غلتاند. جوشش متلاطم در نزدیکی دیون یا در بین دیون ها به شکسته شدن دیون کمک می نماید. جوشش ها بمنظور حرکت دادن چرخشی ذرات در همه جهات به اندازه کافی قوی هستند. برخی از ذرات را می توان دید که در حال غلتیدن به سمت پایین و بطرف حفره آبشستگی هستند، در حالیکه بقیه به پشت تاج برآمدگی



شکل (۲) شکل گرفتن و چرخش به سمت پایین دیون کوچک



شکل (۳) هندسه حفره آبشستگی در حالات مجانب

حفره آبشستگی با کاهش عمق پایاب، به نازل نزدیکتر می‌شود. شکل برآمدگی که در انتهای حفره آبشستگی تشکیل شده، با عمق پایاب تغییر می‌کند. فهمیده شد که در حالات پایاب بلندتر ( $H/b_0 > 4$ ) ارتفاع برآمدگی بزرگتر با یک نوک تیز خواهد شد، در حالیکه با کاهش عمق پایاب، برآمدگی به صاف شدن میل می‌کند. لازم به یادآوری است که در حالات مجانب، پروفیل‌های با  $H/b_0 > 4$ ، همگی بر روی یکدیگر می‌افتند. نه تنها در اعماق پایاب بزرگتر عمق بیشینه آبشستگی یکسان است، بلکه همگی پروفیل‌ها مشابهند.

پرتاب می‌شوند. دیون‌های جابه‌جا شونده در آزمایشات با ماسه درشت‌تر مشاهده نشدند.

### ۲-۳ هندسه آبشستگی در حالات مجانب

شکل ۳a پروفیل‌های آبشستگی مجانب در راستای خط‌المرکز نازل برای آزمایشات با حالات پایاب مختلف در  $F_0 = 10$  را نشان می‌دهد. در این شکل، هر دو محور توسط عرض نازل ( $b_0$ ) نرمال شده‌اند. بمنظور جلوگیری از درهم‌ریختگی، فقط تعدادی از پروفیل‌ها نشان داده شده‌اند. پروفیل‌ها نشان می‌دهد که محل عمق بیشینه

محیط حفره آبشستگی مجانب نرمال شده در شکل ۳b نشان داده شده است. در اعماق پایاب کمتر محل عرض بیشینه حفره آبشستگی میل به نزدیکتر شدن به نازل میکند و عریض تر می باشد. ناتوانی جت در پخش شدن در جهت عمودی (بطرف سطح آزاد) موجب پخش شدن جت در جهت جانبی می شود. این نتایج در عرض حفره آبشستگی در  $H/b0=1$  نسبت به هر حالت دیگر بزرگتر خواهد بود. شکل ۳c، محیط مجانب نرمال شده برآمدگی برای آزمایشات نشان داده شده در شکل های قبلی را نشان می دهد. برآمدگی در اعماق پایاب کمتر، عریض تر می باشد. بعلاوه، شکل برآمدگی در  $H/b0=1$  نیز از سایر حالات پایاب متفاوت می باشد. در ابتدا، در شروع آزمایش با  $H/b0$  کم، شکل برآمدگی با شکل برآمدگی ناشی از سایر اعماق پایاب بسیار مشابه است. اما، با افزایش پخش جانبی جت، حفره آبشستگی بطور جانبی، عریض می شود و بهمان نسبت، برآمدگی نیز عریض می گردد. این برآمدگی عریض تر تشکیل شده اخیر، برآمدگی کم عرض تشکیل شده قبلی را به پایین دست هل داده، منجر به ایجاد شکل نشان داده شده در شکل ۳c می شود که متفاوت از آنی است که در  $H/b0$  بزرگتر ایجاد گردید. شکل ۳d، محیط مجانب نرمال شده برآمدگی برای یک سری از آزمایشات با  $F0=3.9$  را نشان می دهد. می توان گفت که همه داده ها در حالات پایاب بلندتر ( $H/b0 > 4$ ) در نزدیکی هم قرار گرفته اند. برآمدگی در  $H/b0=1$  عریض تر است و در اعماق پایاب کم غیرمتقارن می باشد.

شکل مجانب پروفیل های بستر آبشستگی برای اعداد فرود دانسی متریک ( $F0$ ) مختلف در  $H/b0=18$  در شکل ۳e نشان داده شده است. لازم به ذکر است که با افزایش  $F0$ ، عمق و فاصله عمق بیشینه حفره آبشستگی از نازل، افزایش می یابد. همینطور با افزایش  $F0$ ، ارتفاع و فاصله برآمدگی از نازل افزایش می یابد. شکل ۳f پروفیل ها را برای سه مقدار  $F0$  برای  $H/b0=2$  نشان می دهد. در مقادیر کمتر  $F0$ ، نوک برآمدگی شکل بسیار تیزی دارد، در حالیکه در  $F0=10$ ، برآمدگی صاف می باشد و این امر مستقیماً مربوط به سرعت موضعی غالب می شود (همینطور تنش برشی). شکل ۳g پروفیل ها را در  $F0$  مختلف برای  $H/b0=1$  نشان می دهد. واضح است که اندازه و شکل برآمدگی آشکارا وابسته است به عدد فرود دانسی متریک ( $F0$ ) و عمق پایاب. در اعماق پایاب خیلی کم، برای همه

$F0$ ها، برآمدگی میل به صاف تر شدن دارد. شکل ۳h تغییرات ارتفاع نوک با عمق پایاب را نشان می دهد. با افزایش عمق پایاب، ارتفاع نوک با سرعت تمام افزایش می یابد و تا یک مقدار ثابت بیش از  $H/b0=6$  تثبیت می گردد. بعلاوه، اثر  $F0$  در شکل بطور واضح قابل تشخیص است. اندازه ذره اثر قابل توجهی بر ارتفاع نسبی نوک در حالات مجانب ندارد. بایستی یادآور شد که در  $F0$  بیشتر، ارتفاع برآمدگی اندکی بزرگتر از عمق پایین دست متداول جریان در  $H/b0=1$  می باشد، که این امر در داده های Rajaratnam&Diebel(1981) در  $H/b0 < 1$  نیز مشاهده می شود. Ade&Rajaratnam(1998) با توجه به استغراق، ارتفاع برآمدگی نسبی را طبقه بندی نمودند. با تفسیر مجدد از داده های آنها، می توان گفت که در  $F0$  بیشتر ( $> 10$ )، یک عمق پایاب بحرانی وجود دارد که در مقادیر بیشتر از آن یک افزایش یا کاهش در عمق پایاب موجب افزایش ارتفاع برآمدگی می شود.

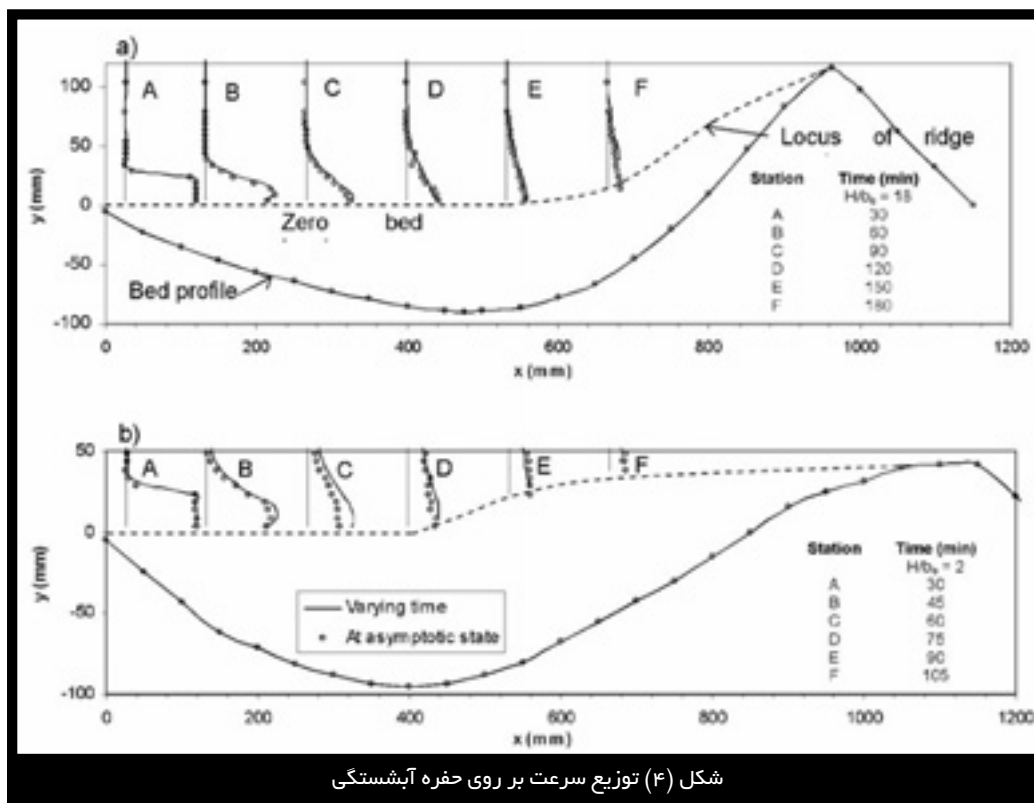
### ۳-۳ توزیع سرعت

توزیع سرعت در ناحیه بالای حفره آبشستگی و برآمدگی در مراحل مختلف از فرآیند آبشستگی مورد بررسی قرار گرفت. توزیع های سرعت در شش محل متفاوت در پایین دست نازل در راستای خط المرکز نازل برداشته شد. بطور نمونه، شکل ۴ توزیع های سرعت در شش محل مختلف،  $A=1b0$ ،  $B=5b0$ ،  $C=10b0$ ،  $D=15b0$ ،  $E=20b0$ ،  $F=25b0$  برای دو عمق پایاب مختلف ( $H/b0=2, 18$ ) در  $F0=10$  در مراحل مختلف از فرآیند آبشستگی را نشان می دهد. خطوط توپر پروفیل های سرعت در زمان های مختلف را مشخص می کند، در حالیکه علامت های دایره ای، اندازه گیری ها در حالات مجانب را مشخص می نماید. پروفیل های بستر مجانب نیز در شکل ۴ برای درک بهتر محل های فیزیکی اندازه گیری های سرعت، نشان داده شده اند. خطوط منقطع تراز بستر صفر و مکان هندسی تاج برآمدگی را نشان می دهند. در شکل ۴a و ۴b، نقطه A نشان می دهد در تمام مدتی که دوره آزمایش مستقل از زمان اندازه گیری باشد، سرعت خروجی جت در فاصله  $1b0(x=26.6mm)$  پایین دست نازل ثابت باقی می ماند. در شکل ۴a تغییر زیادی در پروفیل های سرعت بین حالت زمان مختلف و مجانب در محل های مختلف مشاهده نشد. این امر ناشی از جابه جایی

جهت طولی در یک نقطه نسبت به مقدار متناظر آن در حالت مجانب می‌شد. اما در نقاط E و F، مولفه‌های سرعت بنظر می‌رسد در حالت مجانب بیشتر خواهد شد. در این آزمایش، در حالت مجانب، در راستای خط‌المرکز جت روی تاج برآمدگی سرعتی بیشتر مشاهده شد که در اثر کاهش فضای موجود بود. این نوع رفتار جریان در سایر آزمایشات هنگامیکه پایاب خیلی زیاد بود، مشاهده نمی‌گردید.

نکته ای که می‌توان متذکر شد این است که جت در عمق پایاب کمتر بر روی سطح آزاد در نزدیکی نازل برخورد می‌نماید، متعاقباً، سرعت سطحی بیشتری نسبت به

نسبتاً سریع حفره آبشستگی و برآمدگی بطرف یک اندازه و شکل پایدار می‌باشد. اما برای آزمایش در  $H/b_0=2$  (شکل ۴b)، توزیع‌های سرعت، برخی تغییرات بین زمان متغیر و حالت مجانب در نقاط مختلف بجز نقطه A را نشان می‌دهد. نقطه C محل عرض بیشینه حفره آبشستگی برای آزمایش در عمق پایاب کم می‌باشد، که حدود ۲۳۰ میلیمتر عرض در زمانیکه اندازه‌گیری‌ها انجام می‌شد و ۴۴۵ میلیمتر عرض در حالت مجانب بود. این امر نشان می‌دهد در زمانیکه اولین پروفیل سرعت در نقطه C برداشته می‌شد، جت توسط حفره آبشستگی کم عرض محدود شده، که سرانجام موجب مولفه سرعت بیشتر در



شکل (۴) توزیع سرعت بر روی حفره آبشستگی

ماسه ای غیرچسبنده می‌باشد. مجموعه آزمایشات محدوده ای از حالات پایاب، اعداد فرود دانسی متریک و نسبت‌های اندازه نازل به اندازه ذره را در بر می‌گرفت. معلوم گردید که عمق پایاب بر شکل حفره آبشستگی و برآمدگی مؤثر است. در حالات پایاب کمتر، حفره آبشستگی میل به عرض شدن دارد و معلوم گردید که برآمدگی صاف‌تر خواهد شد و الگوهای آبشستگی متناظر میل به نامتقارن

سایر حالات پایاب مشاهده می‌شود. در بلندترین حالت پایاب ( $H/b_0=18$ )، هیچ نشانی از برخورد جت روی سطح آزاد یافت نمی‌شود.

#### ۴- نتایج

مطالعه حاضر در ارتباط با آبشستگی موضعی ناشی از جت‌های مربعی سه بعدی در اندرکنش با بسترهای

شدن دارند. علاوه بر این، در مقادیر اندک عمق پایاب و عدد فرود دانسی متریک بیشتر، آبشستگی کاملاً متفاوت از سایر حالات آزمایش می باشد. اندازه و شکل برآمدگی شکل یافته در انتهای آبشستگی، وابسته است به مقدار عدد فرود دانسی متریک و نسبت عمق پایاب، بویژه در اعماق

پایاب کمتر. جوشش های متلاطم نقش قابل توجهی را در انتقال رسوب برای ذرات ماسه ریزتر بازی می کنند. معلوم گردید تشکیل دیون های جابه جا شونده و شکسته شدن دیون ها توسط جوشش های متلاطم در آزمایشات با ذرات ریزتر رخ می دهد.

## ۵- نمادها

H: عمق پایاب	b0: اندازه نازل
t: زمان	B: عرض فلوم
U0: سرعت جت متوسط	$d_{16}$ : قطر ماسه، %۱۶ وزنی از آن ریزتر باشد
W: عرض بیشینه حفره آبشستگی	$d_{50}$ : اندازه متوسط مواد بستر
X: فاصله طولی	$d_{84}$ : قطر ماسه، %۸۴ وزنی از آن ریزتر باشد
Y: فاصله عمودی	F0: عدد فرود دانسی متریک $[=U0/\{g(\Delta\rho/\rho)d50\}^{0.5}]$
Z: فاصله جانبی	g: شتاب ثقلی
$\Delta\rho$ : اختلاف بین دانسیته جرمی آب و مواد بستر	h: ارتفاع برآمدگی
$\rho$ : دانسیته جرمی آب	
$\sigma g$ : انحراف معیار هندسی مواد بستر $[=(d_{84}/d_{16})^{0.5}]$	



## ۶- مراجع

- 1- Ade, F. and Rajaratnam, N. 1998. Generalized study of erosion by circular horizontal turbulent jets. J. of Hydr. Research, 36(4): 613-635.
- 2- Ali, K.H.M. and Lim, S.Y. 1986. Local scour caused by submerged wall jets. Proc. of the Instn. of Civil Engrs., Part 2, 81: 607-645.
- 3- Faruque, M.A.A., Sarathi, P. and Balachandar, R. 2004. Transient local scour by submerged three-dimensional wall jets: effect of tailwater depth. Second International Conference on Scour and Erosion, November 14 - 172004, Meritus Mandarin, Singapore, 2: 309-316.
- 4- Lim, S.Y. 1995. Scour below unsubmerged full-flowing culvert outlets. Proc. of the Institution of Civil Engineers, Water Maritime and Energy, 112(2): 136-149.
- 5- Rajaratnam, N. and Berry, B. 1977. Erosion by circular turbulent wall jets. J. of Hydr. Research, 15(3):277-289.
- 6- Rajaratnam, N. and Diebel, M. 1981. Erosion below culvert-like structure. Proc., 5th Canadian Hydrrotechnical Cont, May 26—27, CSCE, 469-484.