

اثر عمق پایاب بر تشکیل حفره آبستگي در پايين دست جت افقي

محمد حسين اميد^{۱*}، حسين حميدي فر^۲ و محسن نصرآبادي^۳

^{۱*} - دانشيار گروه مهندسي آبياري و آباداني، دانشگاه تهران، كرج، ايران. hhamidifar@ut.ac.ir
^۲ و ^۳ - دانشجوي دكترى و دانش آموخته كارشناسي ارشد سازه‌هاى آبي، گروه مهندسي آبياري و آباداني، دانشگاه تهران، كرج، ايران

تاريخ دريافت: ۸۸/۱/۲۲

تاريخ پذيرش: ۸۹/۹/۲۷

چكیده

در اين مقاله، نتايج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی تاثیر عمق پایاب بر آبستگي موضعي پايين دست جهش هيدروليكي ارايه شده است. در مجموع ۵۳ آزمایش با زمان اجرائی ۱۲ ساعت، در دامنه اعماق پایاب مختلف ۳۲/۵-۱۴/۲ سانتی‌متر و به ازای ۵ عدد فرود ذره متفاوت انجام شد. نتايج نشان می‌دهد که عمق پایاب یک پارامتر بسيار تأثیرگذار در ميزان آبستگي است و چگونگی تأثیر آن به عدد فرود ذره و ميزان استغراق بستگی دارد، به گونه‌ای که یک فاکتور استغراق بحرانی وجود دارد که در آن حداقل عمق آبستگي رخ می‌دهد. بر اين اساس و در دامنه آزمایش‌های اين تحقيق، رابطه‌ای برای تعيين اين مقدار بحرانی بر حسب عدد فرود ذره ارائه شده است. نتايج بدست آمده با تحقيقات پيشين مقايسه و مشخص شد که با کاهش طول کف بند، تأثیر عمق پایاب بیشتر می‌شود. همچنين نمودارهای بدون بعدی برای تعيين ميزان آبستگي در شرايط عمق پایاب و اعداد فرود ذره مختلف ارائه شد. در نهايت مشاهده شد که از میان پارامترهای مشخصه حفره آبستگي، تأثیرپذیری حداکثر عمق آبستگي و ارتفاع تل ماسه از عمق پایاب نسبت به گسترش طولی حفره بیشتر است.

کلید واژه ها: آبستگي موضعي، عمق پایاب، جهش هيدروليكي، فاکتور استغراق بحرانی.

مقدمه

مطالعه قرار گرفته است، اما تأثیر عمق پایاب بر فرآیند و مشخصه‌های آبستگي کمتر بررسی شده است که در ادامه نمونه‌هایی از آن ذکر می‌شود. راجارائنام و ديبل (۱۹۸۱) آزمایش‌هایی را بر روی آبستگي ناشی از جت‌های دایره‌ای در عمق‌های پایاب کم انجام دادند و مشاهده کردند که اگر چه حداکثر عمق آبستگي به عمق پایاب نسبي و عرض کانال پايين دست وابسته نيست، اما محل وقوع آن تحت تأثیر اين دو عامل قرار می‌گیرد [۱۰]. از طرفی علی و لیم (۱۹۸۶) گزارش کرده‌اند که در دامنه $12 < F_0 < 2/9$ ، عمق پایاب بر حداکثر عمق آبستگي

آبستگي موضعي رسوبات غير چسبنده در مجاورت سازه‌های هيدروليكي مانند دريچه‌های كشویی، حوضچه‌های آرامش و آبگذرهای جاده از موضوعات قابل توجه محققين در سال‌های اخير بوده و می‌باشد. چنانچه عمق آبستگي از مقدار مجاز بیشتر شود، پایداری پی و به تبع آن پایداری سازه اصلی به خطر می‌افتد. بنابراین پیش‌بینی شکل و ابعاد حفره، در راستای ارائه راهکارهای پیشگیری‌کننده در زمینه کنترل پیامدهای زیان‌بار آبستگي امری اجتناب‌ناپذیر است. اگرچه آبستگي ناشی از جت‌های دیواره‌ای دو-بعدی به طور مفصل توسط محققين مختلف مورد

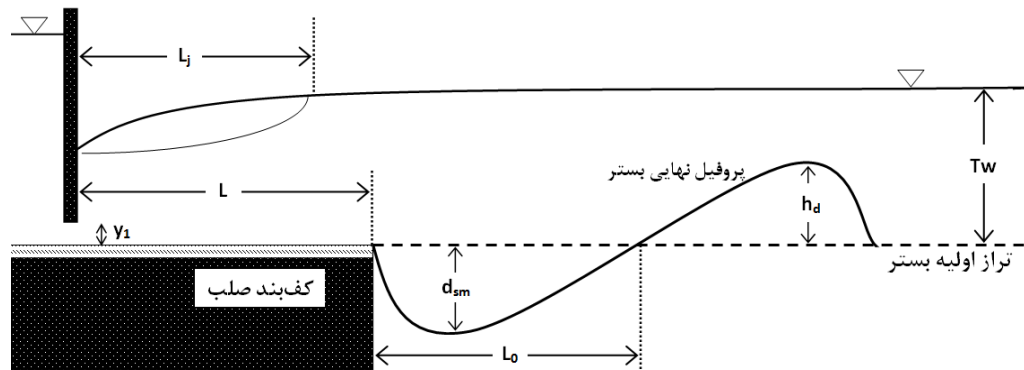
رابطه‌ای برای برآورد ابعاد آبخستگی برای نسبت‌های مختلف پایاب ارائه کردند [۲].

مهرآیین و قدسیان (۱۳۸۷) با مطالعه حفره آبخستگی ایجاد شده توسط جت‌های دیواره‌ای به این نتیجه رسیدند که حداکثر عمق حفره در نسبت‌های عمق پایاب کم به صورت پربودیک افزایش و کاهش می‌یابد، در حالیکه در شرایط با عمق پایاب زیاد، ابعاد حفره آبخستگی بعد از رسیدن به زمان تعادل ثابت می‌ماند [۱]. ساراتی و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی تاثیر عدد فرود ذره، اندازه رسوبات و عمق پایاب بر آبخستگی ناشی از جت دیواره‌ای مستغرق سه-بعدی به این نتیجه رسیدند که به ازای مقادیر کوچک عمق پایاب نسبی، الگوی جریان و به تبع آن، الگوی آبخستگی نامتقارن خواهد بود. این محققین چندین معادله تجربی برای توصیف هندسه آبخستگی پیشنهاد کردند [۱۱]. با توجه به مطالب ذکر شده، مشخص می‌شود که علیرغم مطالعات بسیاری که در زمینه تاثیر عمق پایاب بر هندسه گودال آبخستگی ناشی از شکل‌های مختلف جت جریان انجام شده است، در اکثر موارد اختلاف قابل توجهی بین نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود و در برخی موارد نیز تناقض‌هایی وجود دارد. بنابراین لزوم انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه احساس می‌شود. هدف از انجام این تحقیق مطالعه اثر تغییرات عمق پایاب (فاکتور استغراق) بر پارامترهای مشخصه حفره آبخستگی از قبیل حداکثر عمق آبخستگی، d_{sm} ، حداکثر گسترش طولی حفره آبخستگی، L_0 و ارتفاع تل ماسه بعد از حفره، h_d ، که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند می‌باشد.

در شرایط تعادلی تاثیرگذار است که در آن F_0 عدد فرود ذره است. این محققین در نهایت ذکر کرده‌اند در شرایطی که نسبت عمق پایاب به ضخامت جت از ۱۶ بیشتر باشد، تاثیر عمق پایاب قابل توجه نیست [۴].

اد و راجاراتنام (۱۹۹۸) با انجام آزمایش‌هایی بر روی جت‌های سه-بعدی (در حالتی که عرض جت کمتر از عرض کانال می‌باشد)، گزارش کردند که چنانچه $F_0 > 10$ باشد، تاثیر عمق پایاب قابل توجه است [۳]. بالاچاندار و همکاران (۲۰۰۰) با استفاده از تکنیک تصویربرداری ویدیویی، تاثیر عمق پایاب بر وضعیت دینامیکی آبخستگی موضعی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که وضعیت تعادلی آبخستگی حتی بعد از گذشت ۹۲ ساعت نیز حاصل نمی‌شود [۵]. فاروق و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی تاثیر عمق پایاب بر آبخستگی موضعی ناشی از جت‌های دیواره‌ای سه-بعدی پرداختند و مشاهده کردند که برای اعداد فرود ذره کمتر از $5/0$ ، پارامتر عمق پایاب بدون بعد، تاثیری بر حداکثر عمق آبخستگی ندارد، اما برای اعداد فرود ذره بیشتر از $10/0$ تاثیر عمق پایاب قابل توجه است [۷].

دی و سرکار (۲۰۰۶) آبخستگی پایین‌دست یک کف بند در اثر جت افقی مستغرق را به طور آزمایشگاهی مطالعه کردند و وجود یک عمق پایاب بحرانی را گزارش کردند که در آن حداقل فرسایش رخ می‌دهد. این محققین نمودارهایی برای عمق آبخستگی بر حسب نسبت عمق پایاب به ازای اعداد فرود ذره مختلف ارائه کردند و به این نتیجه رسیدند که برای اعداد فرود ذره بزرگ‌تر، نمودار از حالت خطی خارج شده و انحنا نمودارها بیشتر می‌شود [۶]. موسوی جهرمی و هلالات ناصریان با بررسی تاثیر عمق پایاب بر آبخستگی پایین‌دست جت‌های ریزشی،



شکل ۱- پارامترهای مشخصه حفره آبستگي در پايين دست کف بند

است و همچنین طول کف بند و عرض فلوم ثابت بوده‌اند، بجز پارامترهای F_0 و Tw/y_1 تاثیر سایر پارامترها بررسی نشده است.

برای رسیدن به اهداف این تحقیق، در مجموع ۵۳ آزمایش با ۵ عدد فرود ذره متفاوت در دامنه اعماق پایاب مختلف ۱۴/۲-۳۲/۵ سانتی‌متر، در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران انجام شد. بدین منظور یک فلوم با مقطع مستطیلی به طول ۹/۰ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر مورد استفاده قرار گرفت. شیب کف فلوم در تمام آزمایش‌ها صفر در نظر گرفته شد. جنس دیواره و کف فلوم از پلاستیک فشرده بوده و امکان مشاهده تغییرات آبستگي را فراهم می‌کند. جریان آب از طریق یک سامانه مداربسته وارد مخزن آرام‌کننده در ابتدای کانال می‌شود و پس از عبور از یک سرریز لبه تیز مستطیلی واسنجی شده بدون فشردگی جانبی که شدت جریان به وسیله آن اندازه‌گیری می‌شود وارد تبدیل همگرا کننده می‌گردد.

مواد و روش‌ها

با استفاده از آنالیز ابعادی و تئوری پای باکینگهام، پارامترهای بدون بعد موثر بر ابعاد حفره آبستگي پايين دست جت افقی به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$\frac{d_{sm}}{y_1}, \frac{L_0}{y_1}, \frac{h_d}{y_1} = f(F_0, \frac{U_0 t}{y_1}, \frac{U_0}{w_s}, \frac{d_{50}}{y_1}, \frac{L}{y_1}, \frac{Tw}{y_1}, \frac{B}{y_1}, \sigma_g) \quad (1)$$

که در این رابطه d_{sm} و L_0 به ترتیب حداکثر عمق و حداکثر گسترش طولی حفره آبستگي، h_d حداکثر ارتفاع تل ماسه، $F_0 = U_0 \sqrt{[(S-1)gd_{50}]}^{1/2}$ عدد فرود ذره، U_0 سرعت جت ورودی، $S = \Delta\rho/\rho$ ، ρ جرم مخصوص سیال، ρ_s جرم مخصوص مصالح بستر، g شتاب ثقل، d_{50} اندازه متوسط ذرات، t مدت زمان بعد از آغاز آبستگي، y_1 بازشدگی دریچه، w_s سرعت سقوط ذرات رسوب، L طول کف بند، Tw عمق پایاب، B عرض فلوم و σ_g انحراف معیار هندسی رسوبات می‌باشد. از آنجا که در تحقیق حاضر از یک نوع رسوب با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شده و آبستگي در وضعیت تعادلی مورد بررسی قرار گرفته

نتایج و بحث

با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده مشخص شد که هر دو عامل عدد فرود ذره و عمق پایاب نسبی بر ابعاد حفره آبشستگی تأثیرگذار هستند. در شکل (۲) تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در مقابل عدد فرود ذره به ازای نسبت عمق پایاب ثابت $TW/Y_1 \approx 7$ ارائه شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که به ازای یک عمق پایاب ثابت با افزایش عدد فرود ذره، حداکثر عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.

تغییرات ابعاد حفره آبشستگی به ازای عدد فرود ذره $F_0 = 12/78$ در اعماق پایاب مختلف در شکل (۳) ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش عمق پایاب، گسترش طولی حفره آبشستگی بیشتر می‌شود اما تا یک عمق پایاب معین، ابتدا عمق آبشستگی کاهش یافته و پس از رسیدن به یک حد بحرانی مجدداً افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که این روند ممکن است به ازای سایر اعداد فرود ذره با روند مشاهده شده در شکل (۳) برای $F_0 = 12/78$ متفاوت باشد. به طور مثال به ازای $F_0 = 7/71$ با افزایش عمق پایاب در محدوده داده‌های تحقیق حاضر، حداکثر عمق آبشستگی نیز افزایش می‌یابد.

در شکل (۴) تغییرات حداکثر عمق آبشستگی بدون بعد (d_{sm}/Y_1) در مقابل عمق پایاب نسبی (TW/Y_1) به ازای ۵ عدد فرود ذره مختلف آورده شده است. با توجه به این شکل می‌توان نقش عدد فرود ذره بر چگونگی تأثیر عمق پایاب بر ابعاد حفره آبشستگی را مشاهده کرد. نکته مهم در این نمودار وجود یک عمق پایاب بحرانی برای اعداد فرود ذره

در ابتدای فلوم یک دریچه کشویی، که عرض آن با عرض فلوم برابر است، قرار دارد و جت آب خروجی از آن با تشکیل پرش هیدرولیکی مستغرق بر روی یک کف بند صلب به طول ۱/۰ متر توسعه می‌یابد. بازشدگی دریچه در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر ۲/۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در انتهای کف بند، یک مخزن به عمق ۰/۲ متر و طول ۱/۶۵ متر که هم‌عرض کانال است تعبیه شده که نمونه‌های رسوب مورد آزمایش درون آن قرار می‌گرفتند. عمق پایاب توسط یک دریچه کشویی که در انتهای فلوم قرار دارد تنظیم می‌شد. رسوبات غیر چسبنده مورد استفاده شامل ماسه با دانه‌بندی یکنواخت از جنس کوآرتز با اندازه متوسط ۱/۸۵ میلی‌متر، انحراف معیار هندسی $\sigma_g = 1/1$ و زاویه ایستایی $\phi = 37/6^\circ$ می‌باشد. با انجام چند آزمایش مقدماتی، زمان تعادل نسبی حفره آبشستگی ۱۲ ساعت پس از آغاز آزمایش تعیین شد.

برای اجتناب از وقوع آبشستگی ناخواسته در ابتدای آزمایش، سطح بستر در طول بازه رسوبی مورد آزمایش توسط یک صفحه نازک به ضخامت ۲mm از جنس پلاکسی‌گلاس پوشانده می‌شد. پس از تنظیم دقیق دبی و عمق جریان، این صفحه به آرامی و به گونه‌ای که کم‌ترین آشفتگی را در وضعیت جریان و سطح بستر ایجاد کند، از انتهای کانال خارج می‌گردید. برداشت پروفیل بستر در پایان آزمایش توسط عمق سنج با دقت $\pm 0/1$ میلی‌متر صورت گرفت و با توجه به آن پارامترهای مشخصه حفره آبشستگی استخراج شد. همچنین برای برخی از آزمایش‌ها، طول پرش نیز اندازه‌گیری شد. با بررسی پروفیل سطح آب، نقطه‌ای که در آن سطح آب به صورت افقی در می‌آید به عنوان انتهای پرش در نظر گرفته می‌شد.

تأثیر عمق پایاب را به خوبی نشان می‌دهد. در این شکل هم می‌توان به ازای هر عدد فرود ذره، یک فاکتور استغراق بحرانی (S_c) تشخیص داد که متناظر با کم‌ترین عمق آبستتگی است.

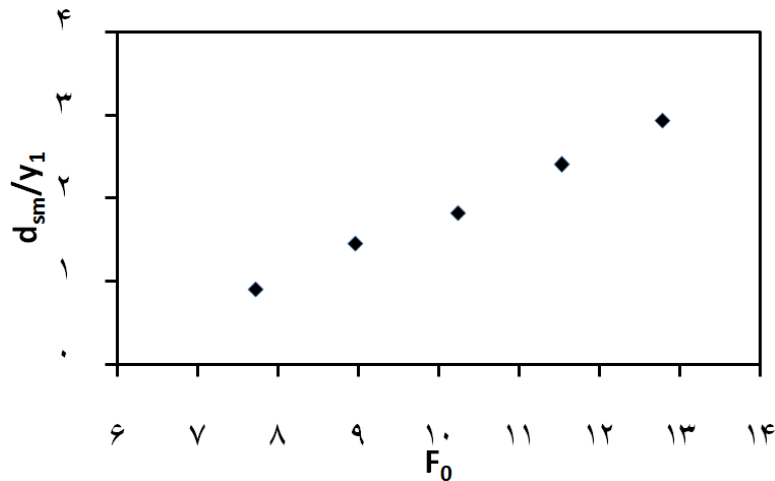
بنابراین با تعیین مقدار فاکتور استغراق بحرانی برای اعداد فرود ذره مختلف، رابطه‌ای برای تعیین این مقدار بحرانی به صورت رابطه (۲) بدست می‌آید که در شکل (۶) ترسیم شده است.

$$S_c = -0.075 F_0 + 1.637, \quad R^2=0.88 \quad (2)$$

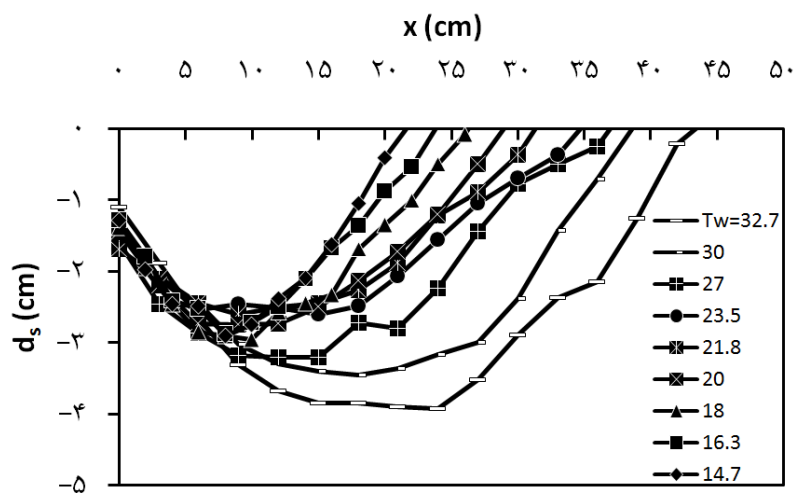
با استفاده از این رابطه می‌توان فاکتور استغراق بحرانی متناظر با کم‌ترین میزان آبستتگی را در محدوده $9 < F_0 < 13$ به سهولت محاسبه کرد.

بزرگ‌تر از $8/96$ است که مقدار دقیق آن به عدد فرود ذره بستگی دارد.

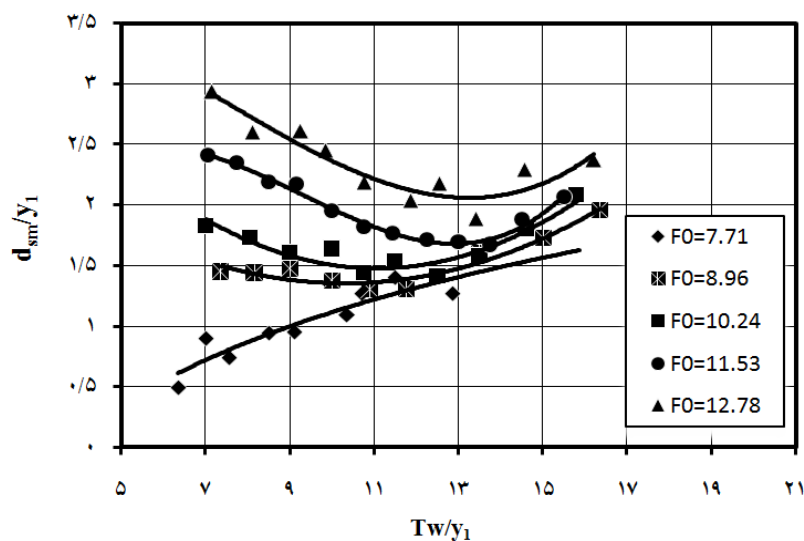
از آنجایی که حفره آبستتگی در تحقیق حاضر در اثر یک جت افقی ناشی می‌شود، می‌توان سازوکار تغییرات عمق پایاب را به تغییرات پارامترهای جت افقی مرتبط دانست. برای بررسی دقیق‌تر چگونگی تأثیر عمق پایاب بر پارامترهای حفره آبستتگی، تغییرات حداکثر عمق آبستتگی بدون بعد در مقابل فاکتور استغراق (S) در شکل (۵) آورده شده است. فاکتور استغراق به صورت $S = (Tw - y_2) / y_2$ تعریف می‌شود [۹] که در آن y_2 عمق ثانویه جهش آزاد با عمق جت ورودی y_1 می‌باشد. تغییرات حداکثر عمق آبستتگی در این شکل از روندی مشابه شکل (۵) پیروی می‌کند که نشان می‌دهد فاکتور استغراق



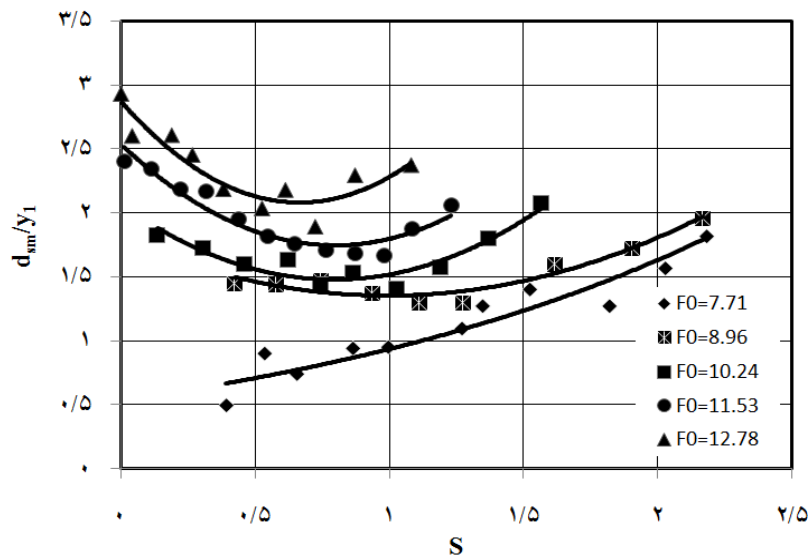
شکل ۲- تأثیر عدد فرود ذره بر میزان آبستتگی در $Tw/y_1 \approx 7$



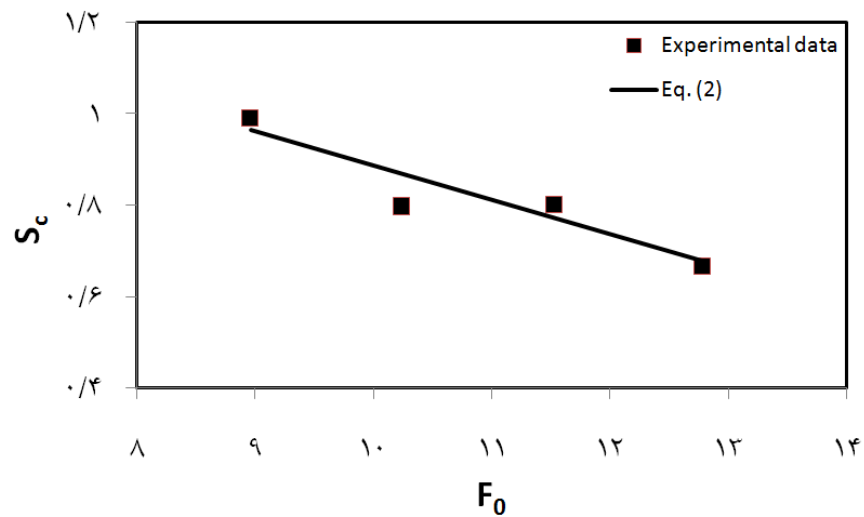
شکل ۳- تغییرات حفره آبستگي در اعماق پایاب مختلف به ازای $F_0=12/78$



شکل ۴- تغییرات حداکثر عمق آبستگي بدون بعد در مقابل عمق پایاب نسبي



شکل ۵- تغییرات حداکثر عمق آبستگي بدون بعد در برابر فاکتور استغراق



شکل ۶- تغییرات فاکتور استغراق بحرانی در برابر عدد فرود ذره

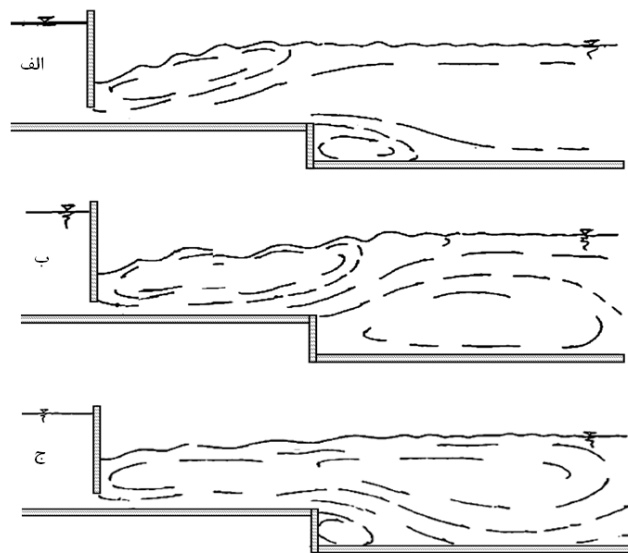
می‌توان از مشخصه‌های جت افقی مستغرق استفاده کرد. تاکانابو و همکاران (۱۹۹۶) تحقیقی را بر روی تاثیر طول کف بند و عمق پایاب بر مشخصات جهش هیدرولیکی مستغرق که به یک پله ناگهانی ختم می‌شود انجام دادند [۱۲]. نتایج آزمایش‌های این

تاکنون اظهارنظری از سوی محققین پیشین در مورد علت وجود عمق بحرانی بیان نشده است. به همین دلیل در تحقیق حاضر تلاش زیادی برای تفسیر وجود عمق پایاب بحرانی انجام شد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، برای شناخت سازوکار تاثیر عمق پایاب

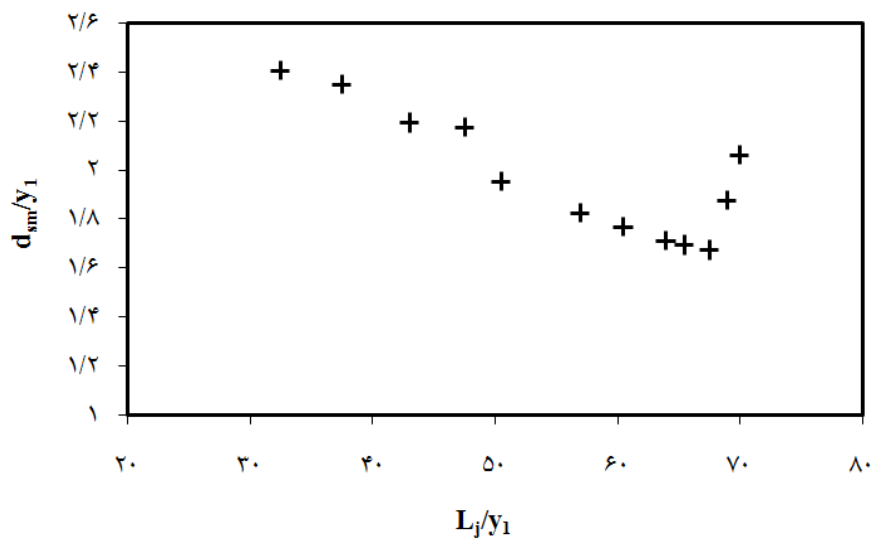
چنانچه عمق پایاب باز هم افزایش یابد ($S > S_c$)، جریان موج به جهش نوع B یا (B -jump) تبدیل می‌شود و جریان پس از ترک کف بند، یک گردابه بزرگ که شامل جهش هیدرولیکی و ناحیه بعد از پایین‌افتادگی می‌شود را تشکیل می‌دهد. بلافاصله بعد از پایین‌افتادگی نیز یک ناحیه با جریان برگشتی به وجود می‌آید و باعث گسترش آبشستگی در راستای عمقی می‌شود (شکل ۷-ج). بنابراین انتظار می‌رود در شرایطی که فاکتور استغراق از S_c بزرگ‌تر است عمق آبشستگی بیشتری رخ دهد. همچنین با بررسی تغییرات حداکثر عمق آبشستگی در برابر طول پرش به ازای عدد فرود ذره $F_0 = 10/95$ مشخص می‌شود که در اینجا هم یک مقدار بحرانی برای طول پرش بدست می‌آید که به ازای آن کم‌ترین میزان آبشستگی رخ می‌دهد (شکل ۸). بدین ترتیب که در ابتدا با افزایش طول بدون بعد جهش، عمق آبشستگی افزایش یافته و پس از رسیدن به یک مقدار بحرانی افزایش می‌یابد. برای توجیه این فرآیند بایستی توجه داشت که با افزایش طول جهش، جریان به حالتی می‌رسد که جهش به طور کامل بر روی کف بند توسعه نمی‌یابد (جریان نوع $wave$). بنابراین جریان فوق بحرانی خروجی از بازشدگی دریچه کشویی قبل از آنکه با تشکیل جهش هیدرولیکی کاملاً مستهلک شود بر روی بستر رسوبی جریان می‌یابد و گردابه تشکیل شده باعث گسترش بیشتر حفره آبشستگی در راستای طولی می‌شود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، این حالت متناظر با وقوع کم‌ترین میزان آبشستگی است.

محققین نشان داد که با افزایش عمق پایاب، الگوی جریان عبوری از پله به طور قابل‌توجهی تغییر می‌کند (شکل‌های ۷-الف، ب و ج).

با توجه به شکل ۷-الف چنانچه فاکتور استغراق کم باشد ($S < S_c$) پرش هیدرولیکی کاملاً بر روی کف بند توسعه می‌یابد و آن را جهش نوع A یا A -jump می‌نامند. در این حالت جریان قبل از رسیدن به انتهای کف بند به وضعیت زیر بحرانی می‌رسد و بعد از کف بند جدایش جریان اتفاق می‌افتد و یک ناحیه با جریان برگشتی در پایین دست پله به وجود می‌آید. این ناحیه با جریان برگشتی منجر به گسترش گودال آبشستگی در راستای عمقی می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که در این حالت عمق آبشستگی قابل‌توجه باشد. با افزایش عمق پایاب (افزایش S) جهش به طور کامل بر روی کف بند توسعه نمی‌یابد و جریان فوق بحرانی پس از ترک کف بند به سمت بالا منحرف شده و نوساناتی در سطح آب مشاهده می‌شود. در این نوع جریان دو گردابه مجزا یکی در محدوده جهش هیدرولیکی و دیگری بلافاصله بعد از پایین‌افتادگی کف بند مشاهده می‌شود. گردابه دوم باعث گسترش بیشتر حفره آبشستگی در راستای طولی می‌شود و تاثیر چندانی در افزایش عمق آبشستگی ندارد. این وضعیت متناظر با عمق پایاب بحرانی ($S = S_c$) در آزمایش‌های تحقیق حاضر است که در آن حداقل عمق آبشستگی و حداکثر گسترش طولی حفره مشاهده می‌شود. این نوع جریان را در اصطلاح موج ($wave$) می‌نامند (شکل ۷-ب).



شکل ۷- تغییرات الگوی جریان در اثر تغییر عمق پایاب [۱۲]



شکل ۸- تغییرات عمق آبستگی بدون بعد در برابر طول جهش

است. به گونه‌ای که در آزمایش‌های ایواگاکي همکاران (۱۹۶۵) که در شرایط بدون کف بند ($L=0$) انجام شده است [۸]، مقدار آبستگی تا ۲ برابر بیشتر از آزمایش‌های دی و سرکار (۲۰۰۶) بر روی کف بند

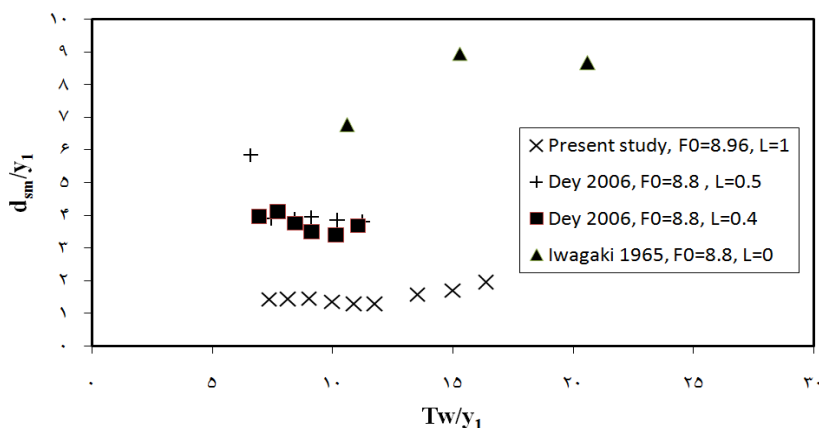
در شکل (۹) نتایج حاصل از تحقیق حاضر در کنار نتایج بدست آمده در تحقیقات قبلی آورده شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، طول کف بند نیز یک پارامتر بسیار تأثیرگذار در میزان آبستگی

رسوباتی که از بستر جدا می‌شوند بعد از خارج شدن از حفره بر روی هم انباشته شده و تشکیل یک تل ماسه را می‌دهند. ارتفاع تل ماسه باعث تغییر در خصوصیات جریان و در نتیجه تغییر در هندسه حفره آبستگي می‌شود. در شکل (۱۱) تغییرات ارتفاع بدون بعد تل ماسه (h_d/y_1) در مقابل عمق پایاب بدون بعد آورده شده است که روندی صعودی مشابه شکل (۱۰) را دنبال می‌کند.

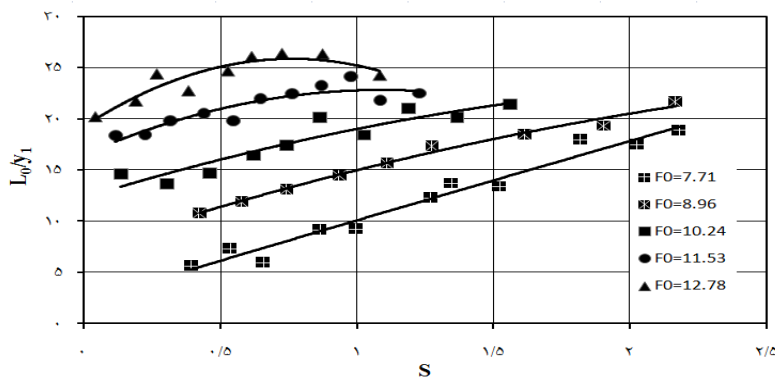
در تحقیقاتی که قبلاً انجام شده، مشخص شده است که در مورد فرآیند رسوبگذاری بر خلاف پدیده فرسایش مصالح بستر، نمی‌توان انتظار داشت هر آنچه که در مدل‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌شود در نمونه اصلی (پروتوتایپ) هم رخ دهد. به عبارت دیگر در اثر تجمع رسوبات در انتهای حفره آبستگي در مدل آزمایشگاهی معمولاً تل ماسه تشکیل می‌شود، در حالیکه ممکن است در نمونه اصلی تل ماسه مشاهده نشود [۵]. بنابراین تاثیر وجود تل ماسه بر دقت نتایج مشاهده شده در مدل آزمایشگاهی و نمونه اصلی هنوز به درستی مشخص نیست.

با طول $0/5-0/4$ متر می‌باشد [۶]. در حالیکه در آزمایش‌های تحقیق حاضر که با استفاده از یک کف بند به طول $1/0$ متر انجام شده است، کم‌ترین میزان آبستگي انجام می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با کاهش طول کف بند تاثیر عمق پایاب بر میزان آبستگي بیشتر می‌شود.

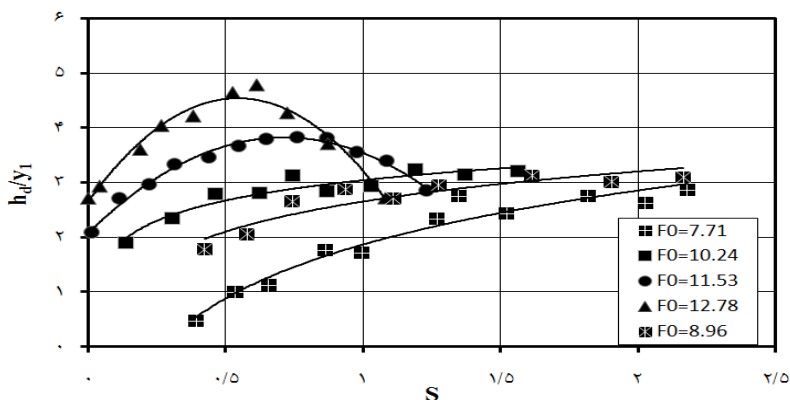
از دیگر پارامترهای مشخصه آبستگي، طول حفره است که با توجه به شکل (۱) معادل فاصله از انتهای کف بند تا نقطه‌ای است که بستر فرسایش یافته به تراز اولیه بستر قبل از وقوع آبستگي برخورد می‌کند. پیش‌بینی تقریبی این طول مشخصه به طراحان در انتخاب طولی از بستر که به حفاظت نیاز دارد کمک می‌کند. در شکل (۱۰) تغییرات شکل بدون بعد این پارامتر (L_0/y_1) در مقابل فاکتور استغراق ترسیم شده است. با توجه به این شکل با افزایش فاکتور استغراق که نشان دهنده افزایش عمق پایاب است، گسترش طولی حفره آبستگي افزایش می‌یابد و عمق پایاب بحرانی در مورد پارامتر L_0 چندان قابل توجه نیست. لازم به ذکر است که در بررسی پیشینه تحقیقات انجام شده، به چگونگی تغییرات پارامتر L_0 بر حسب عمق پایاب هیچ‌گونه اشاره‌ای نشده است.



شکل ۹- مقایسه تغییرات عمق آبستگي در برابر عمق پایاب با نتایج محققین پیشین



شکل ۱۰- تغییرات گسترش طولی حفره آبستگي در برابر فاکتور استغراق



شکل ۱۱- تغییرات حداکثر ارتفاع تل ماسه در مقابل فاکتور استغراق

نتیجه‌گیری

سعی شد تا وجود عمق پایاب بحرانی به مشخصات جریان عبوری از روی بستر فرسایش پذیر ارتباط داده شود. نتایج نشان داد که با افزایش فاکتور استغراق، جریان به وضعیتی می‌رسد که جهش به طور کامل بر روی کف بند تشکیل نمی‌شود. در این حالت با توجه به مقدار عمق پایاب، امکان تشکیل دو نوع گردابه وجود دارد که با دو سازوکار متفاوت می‌تواند باعث افزایش ابعاد گودال در راستای عمقی و یا طولی شوند. با مقایسه نتایج تحقیق حاضر و تحقیقات پیشین مشخص شد که طول کف بند هم یک پارامتر بسیار تأثیرگذار بر فرآیند آبستگي است و با افزایش طول کف بند، میزان آبستگي و همچنین تأثیر عمق پایاب کاهش می‌یابد. در نهایت مشاهده شد که تأثیرپذیری

نتایج نشان می‌دهد که عمق پایاب یک پارامتر بسیار تأثیرگذار بر فرآیند آبستگي است و میزان و چگونگی تأثیر آن به عدد فرود ذره بستگی دارد، به گونه‌ای که به ازای برخی از اعداد فرود ذره، یک عمق پایاب بحرانی مشاهده می‌شود که در آن کم‌ترین میزان عمق آبستگي رخ می‌دهد. بر همین اساس، رابطه تجربی برای تعیین مقدار بحرانی فاکتور استغراق بر حسب عدد فرود ذره ارائه شد. در عین حال به ازای عمق پایاب بحرانی، گسترش طولی گودال آبستگي نسبت به سایر اعماق پایاب بیشتر است. با بررسی الگوی آبستگي و الگوی جریان جت سیال فرسایش دهنده و استفاده از نتایج حاصل از تحقیقات پیشین،

حداکثر عمق آبستگي و ارتفاع تل ماسه از عمق پایاب در مقایسه با طول حفره بیشتر است. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده، در محدوده آزمایش‌های این تحقیق برقرار می‌باشد.

منابع

۱. مهرآئین م. و قدسیان م. ۱۳۸۷. بررسی حفره آبستگي ایجاد شده توسط جت‌های دیواره‌ای. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز.
۲. موسوی‌جهرمی ح. و هلال‌ات‌ناصریان ح. ۱۳۸۶. بررسی تاثیر عمق پایاب بر آبستگي پایین‌دست جت‌های ریزشی. ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهرکرد، صفحات ۳۴۵-۳۵۴.
3. Ade F. and Rajaratnam N. 1998. Generalized study of erosion by circular horizontal turbulent jets, *Journal of Hydraulic Research, IAHR* 36 (4):613–635.
4. Ali K.H.M. and Lim S.Y. 1986. Local scour caused by submerged wall jets. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers Part 2* (81):607–645.
5. Balachandar R., Kells J.A., and Thiessen R.J. 2000. The effect of tailwater depth on the dynamics of local scour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, (27):138-150.
6. Dey S. and sarkar A. 2006. Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets. *Journal of hydraulic engineering (ASCE)*, 132(3):246-257.
7. Faruque M. A. A., Sarathi P. and Balachandar R. 2006. Clear water local scour by submerged three-dimensional wall jets: effect of tailwater depth. *journal of hydraulic engineering (ASCE)*, 132(6):575-580.
8. Iwagaki Y., Tschiya Y. and Imamura M. 1965. Studies of the local scour from flows downstream of an outlet. *Disaster Prevention Research, Kyoto University Annuals*(8):363-377. (In Japanese).
9. Rajaratnam, N. 1967. *Hydraulic Jumps. Advances in Hydro-science. Vol. 4, Academic Press, New York*, pp.197-280.
10. Rajaratnam, N. and Diebel, M. 1981. Erosion below Culvert-like structures. *Proceedings of the 6th Canadian Hydrotechnical Conference*, pp. 469–484.
11. Sarathi P., Faruque M.A.A. and Balachandar R. 2008. Influence of tailwater depth, sediment size and densimetric Froude number on scour by submerged square jets. *journal of hydraulic research*, 46(2):158-175.
12. Takanobu N, Rippei M and Van Deng N. 1996. Submerged jump at an abrupt drop. *Hosei University Research Report No. 32*. pp. 13-27.