

آبشستگی موضعی ناشی از جت‌های دیواره‌ای سه‌بعدی مایل

مجتبی مهرآیین^۱، مسعود قدسیان^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد مهندسی آب، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

Ghods@modares.ac.ir

چکیده- در مقاله حاضر نتایج به دست آمده از ۶۳ آزمایش در زمینه آبشستگی توسط جت‌های دیواره‌ای سه‌بعدی ارائه شده است. زاویه جت‌های مورد مطالعه نسبت به افق از ۰ تا ۲۰ درجه و محدوده عدد فرود ذرات از ۳/۹ تا ۱۲/۸ و نسبت عمق پایاب به قطر نازل $(\frac{Y_f}{D})$ از ۱/۵ تا ۱۹ متغیر بود. در این تحقیق نخست سازوکار آبشستگی ناشی از این نوع جت و سپس اثر زاویه قرارگیری جت دیواره‌ای نسبت به افق بر شرایط مختلف عمق پایاب و اثر عدد فرود ذرات بر ابعاد حفرة آبشستگی مطالعه و روابط مناسبی ارائه شده است. نتایج نشان داد که میزان کاهش عمق حفرة آبشستگی با افزایش عمق پایاب بیشتر می‌شود. در جت‌های مایل نیز مانند جت‌های افقی، برای عمق پایاب مقدار بهینه‌ای وجود دارد که افزایش و کاهش عمق پایاب نسبت به آن باعث افزایش عمق حفرة آبشستگی می‌شود. این مقدار از عمق پایاب با افزایش زاویه جت نسبت به افق افزایش می‌یابد. ابعاد حفرة آبشستگی به جز در چند مورد خاص که در مقاله آورده شده، در جت‌های مایل کمتر از جت‌های افقی است. با توجه به نتایج می‌توان گفت که از جت‌های مایل می‌توان به‌عنوان راه حلی برای کاهش ابعاد حفرة آبشستگی جت‌های دیواره‌ای استفاده کرد.

کلیدواژگان: مطالعات آزمایشگاهی، آبشستگی، جت سه‌بعدی، جت مایل، جت دیواره‌ای.

۱- مقدمه

آب مورد نیاز نیروگاه، تخمین صحیح ابعاد حفرة آبشستگی ایجاد شده بر اثر جت‌های خروجی الزامی است.

پارامترهای متعددی بر ابعاد حفرة آبشستگی ناشی از جت‌های دیواره‌ای تأثیر دارند که عبارتند از: عمق پایاب،

جت خروجی از بدنه سد سرعت زیادی داشته و می‌تواند باعث آبشستگی در پایین دست سد شود. برای تعیین عمق پی سد، اطمینان از پایداری شیب‌های کنار رودخانه و سازه‌های قرارگرفته در پایین دست سد و نیز تعیین ارتفاع

تعدادل بررسی شود، این پارامتر تأثیر چندانی بر ابعاد حفرة آبشستگی ندارد.

تحقیقات (Lim and Chin (1992) در زمینه اثر نایکنواختی مصالح بر سازوکار و ابعاد حفرة آبشستگی توسط جت‌های دیواره‌ای سه‌بعدی نشان داد که وجود لایه‌ای از مصالح درشت‌دانه به هم قفل شده، موجب کاهش ابعاد حفرة آبشستگی در مصالح نایکنواخت می‌شود. در مراحل نخستین آبشستگی، ذرات ریزدانه از درون حفرة آبشستگی به صورت ذرات معلق خارج شده و ذرات درشت‌تر از طریق حرکت‌های غلتشی انتقال می‌یابند.

برخی از محققان تحقیقاتی را در زمینه کاهش ابعاد حفرة آبشستگی ناشی از جت‌ها انجام دادند. برای مثال می‌توان به تحقیق (Emami and Schleiss (2006) و Rajaratnam and Aderibigbe (1993) اشاره کرد. Emami and Schleiss (1993) با استفاده از بلوک‌های مکعبی بتنی، ابعاد حفرة آبشستگی پایین‌دست جت‌های دیواره‌ای سه‌بعدی را کاهش دادند. Rajaratnam and Aderibigbe (1993) با استفاده از صفحات سوراخدار، ابعاد حفرة آبشستگی ناشی از جت‌های دیواره‌ای دوبعدی خارج شده از زیر دریچه را کاهش دادند. یکی از روش‌های متداول دیگر برای کاهش ابعاد حفرة آبشستگی ناشی از جت‌های دیواره‌ای، استفاده از کف‌بند است. استفاده از بلوک‌های بتنی و کف‌بند در پایین‌دست جت‌های خروجی، هزینه زیادی دارد. علاوه بر این احتمال تخریب آنها بر اثر نیروی برکنش وجود دارد. لذا محققان به دنبال روش‌های جدید برای کاهش ابعاد حفرة آبشستگی ایجاد شده توسط این نوع جت‌ها بوده‌اند.

بررسی‌های نویسندگان مقاله حاضر نشان داد که تحقیقی در زمینه اثر زاویه جت دیواره‌ای نسبت به افق بر ابعاد حفرة آبشستگی انجام نشده است. در مقاله حاضر اثر

سرعت جریان و سطح مقطع جت، دانه‌بندی مصالح، قطر و چگالی مصالح، میزان هوای ورودی به جت و عرض کانالی که جت به آن وارد می‌شود. تحقیقات متعددی در زمینه نحوه تأثیر این پارامترها بر ابعاد حفرة آبشستگی انجام شده است. در این قسمت به صورت خلاصه به جمع‌بندی نحوه تأثیر پارامترهای مختلف بر ابعاد حفرة آبشستگی ایجاد شده توسط جت‌های دیواره‌ای سه‌بعدی پرداخته می‌شود.

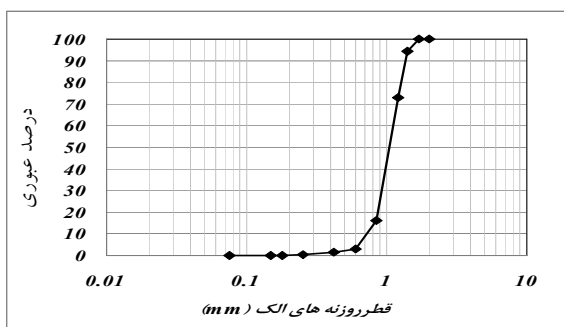
تحقیقات (Ali and Lim, Rajaratnam and Berry (1977) (1986)، (Dey and Sarkar (2006) و (Sui et al. (2008) نشان داد که عدد فرود ذرات (Fr_d) یکی از مهمترین پارامترها در تعیین ابعاد حفرة آبشستگی است.

تحقیقات (Ali and Lim (1986) نشان داد که برای عمق پایاب مقدار بهینه‌ای وجود دارد که افزایش یا کاهش عمق پایاب نسبت به این مقدار باعث افزایش ابعاد حفرة آبشستگی می‌شود. نتایج تحقیقات (Ade and Rajaratnam (1998) نشان داد که اگر عدد فرود ذرات از ۱۰ بیشتر باشد، ابعاد حفرة و حداکثر عمق حفرة آبشستگی با افزایش عمق پایاب افزایش می‌یابد و تفاوت بین حداکثر عمق آبشستگی در شرایط عمق کم و زیاد پایاب با افزایش عدد فرود ذرات افزایش می‌یابد. (Lim (1995) نشان داد که اگر نسبت عرض کانال به قطر جت از ۱۰ بیشتر باشد، افزایش عرض کانال تأثیری بر ابعاد حفرة آبشستگی ندارد. (Sui et al. (2008) نشان داد که اگر نسبت عرض کانال به قطر جت بیشتر از ۳۰ باشد، ابعاد حفرة آبشستگی تحت تأثیر دیواره‌های کانال نیز می‌باشد.

بر طبق تحقیقات (Sarathi et al. (2008) پارامتر $\frac{D}{d_{50}}$ ضخامت جت و d_{50} قطری که ۵۰ درصد مصالح از آن ریزتر است) فقط در برداشتهای زمانی ابعاد حفرة آبشستگی تأثیر دارد و اگر ابعاد حفرة آبشستگی در شرایط

۳- تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایشها

آزمایشها در کانالی مستطیلی و افقی با طول ۱۰ متر، عرض ۵۸ سانتی متر و ارتفاع ۱ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. برای تولید جت از لوله استیل مستقیمی به طول ۲ متر استفاده شد. آزمایشها با دو جت با قطرهای داخلی برابر ۲۰ و ۱۰ میلی متر انجام شد. برای اندازه گیری دبی جریان جت از نوعی دبی سنج که قابلیت اندازه گیری دبی در محدوده ۰/۲۵ تا ۲/۵ m³/hr را دارد استفاده شده است. دبی اندازه گیری شده توسط این دستگاه به روش حجمی کنترل شد تا از صحت دبی جریان عبوری اطمینان حاصل شود. مصالح به کار رفته از جنس سیلیس است که نمودار دانه بندی آن در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱ دانه بندی مصالح

قطر میانگین مصالح $d_{50}=1.05\text{mm}$ و $\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} = 1.25$ بوده و لذا دانه بندی مصالح یکنواخت است.

ضخامت مصالح در پایین دست جت برابر ۴۰ سانتی متر است. محل قرارگیری لبه داخلی پایین لوله جت، مماس بر سطح رسوبهای کف کانال بود. برای تنظیم عمق پایاب

زاویه جت دیواره‌ای و پارامترهای دیگر بر ابعاد حفرة آبشستگی بررسی و امکان استفاده از این جت‌ها به عنوان گزینه‌ای برای کاهش ابعاد حفرة آبشستگی مشخص می‌شود.

۲- تحلیل ابعادی

پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر ابعاد حفرة آبشستگی ایجاد شده بر اثر جت‌های دیواره‌ای سه بعدی عبارتند از: سرعت جت خروجی از نازل v ، قطر نازل D ، عمق پایاب Y_t ، قطر میانگین مصالح بستر d_{50} ، شتاب ثقل g ، چگالی مصالح ρ_s ، چگالی سیال ρ ، لزجت سینماتیکی سیال ν ، عرض کانال B و زاویه قرارگیری جت نسبت به افق θ . بنابراین اگر ϕ یکی از ابعاد حفرة آبشستگی (عمق حفرة، طول حفرة، محل قرارگیری انتهای برآمدگی پایین حفرة یا عرض حفرة آبشستگی) باشد:

$$\phi = f(v, D, Y_t, d_{50}, g, \rho_s, \rho, \nu, B, \theta) \quad (1)$$

با انتخاب پارامترهای D, v, ρ_s به عنوان پارامترهای تکراری و استفاده از قانون باکینگهام رابطه (۲) استخراج می‌شود.

$$\frac{\phi}{D} = f\left(\frac{Y_t}{D}, \frac{D}{d_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{v^2}{g \times D}, \theta, \frac{B}{D}, \frac{v \times D}{\nu}\right) \quad (2)$$

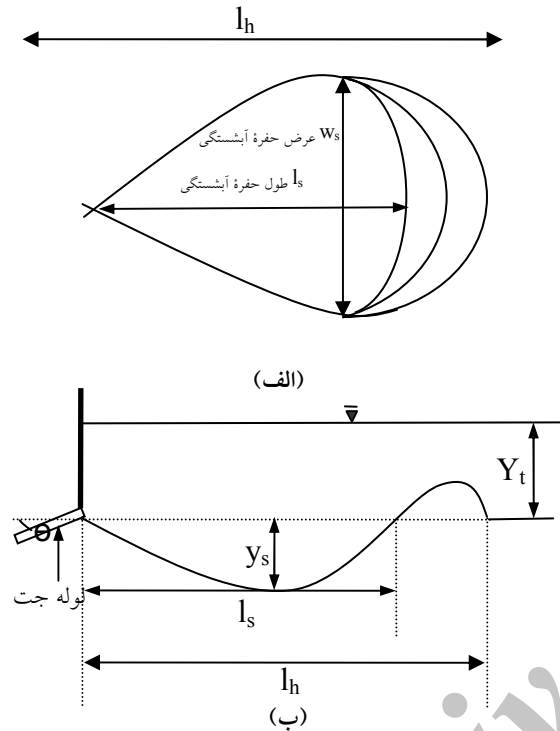
با ترکیب پارامترهای بی بعد $\frac{D}{d_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{v^2}{g \times D}$ عدد فرود

$$\text{ذرات به صورت } Fr_d = \frac{v}{\sqrt{g \times \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \times d_{50}}} \text{ به دست}$$

می‌آید. مقادیر B/D و D/d_{50} در این تحقیق ثابت و به ترتیب برابر ۲۹ و ۱۹ است. $\frac{v \times D}{\nu}$ عدد رینولدز جت است که به دلیل آشفته بودن جریان جت می‌توان از اثر آن صرف نظر کرد. بنابراین رابطه ۲ به صورت رابطه (۳) خلاصه می‌شود.

$$\frac{\phi}{D} = f(Fr_d, \frac{Y_t}{D}, \theta) \quad (3)$$

برآمدگی در پایین دست حفره آبشستگی l_h و پروفیل طولی حفره آبشستگی اندازه‌گیری می‌شد (شکل ۳). زمان آزمایشها از ۲۴ تا ۵۲ ساعت متغیر است.

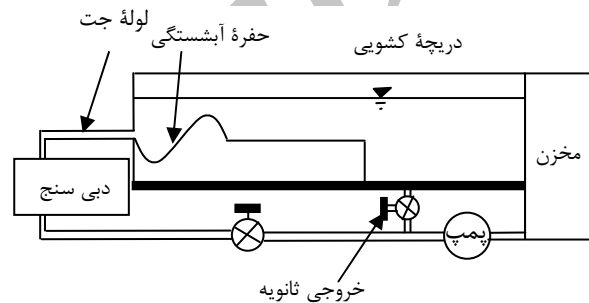


شکل ۳ پارامترهای آبشستگی الف- در پلان ب- در مقطع

۴- تعیین زمان تعادل حفره آبشستگی

محققان مختلف زمان تعادل حفره آبشستگی را متفاوت در نظر گرفته‌اند. در آزمایشهای Dey and Sarkar (2004) مدت زمان تعادل از ۱۲ تا ۱۸۰ ساعت وابسته به شرایط آزمایش متغیر بود. مدت زمان تعادل در آزمایشهای Faruque et al. (2006) برای مصالح درشت‌دانه (۲/۴۶ میلی‌متر)، برابر ۲۴ ساعت و برای مصالح ریز دانه (۰/۷۱ میلی‌متر)، برابر ۹۶ ساعت بود. مطالعات Ade and Rajaratnam (1998) نشان داد که سرعت جت دیواره‌ای بر زمان تعادل حفره آبشستگی تأثیر می‌گذارد. تحقیقات

از دریچه‌های کشویی در انتهای کانال استفاده شد. برای اندازه‌گیری عمق پایاب و پروفیل طولی و ابعاد حفره آبشستگی از عمق‌سنج دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر که بر روی تسمه‌ای قرار داشت، استفاده شد. نمایی از تجهیزات آزمایشگاهی در شکل ۲ آورده شده است. ۶۳ آزمایش با تغییر عمق پایاب، سرعت جت و زاویه جت انجام شد. محدوده تغییرات متغیرها در جدول ۱ آورده شده است.

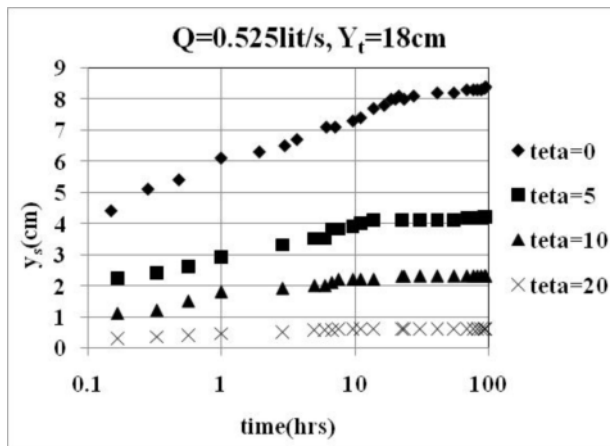


شکل ۲ نمایی از وسایل آزمایشگاهی

جدول ۱ محدوده تغییرات پارامترها

پارامتر	عمق پایاب Y_t (cm)	سرعت جت خروجی v (m/s)	زاویه جت θ°
محدوده تغییرات	۳-۲۲	۰/۵-۱/۶۷	۰-۲۰

برای انجام آزمایشها نخست سطح رسوبها با استفاده از ورقه فلزی آلومینیمی محافظت شد و کانال با استفاده از پمپ دیگری، تا ارتفاع پایاب مورد نظر پر شد. با باز کردن شیر متصل به لوله جت و تنظیم جریان خروجی تا دبی مورد نظر و بازمینی عمق پایاب، صفحه آلومینیمی از روی مصالح برداشته شده و آبشستگی آغاز می‌شد. پس از انجام آزمایشها عمق آبشستگی y_s ، عرض حفره آبشستگی w_s ، طول حفره آبشستگی l_s و محل قرارگیری انتهای



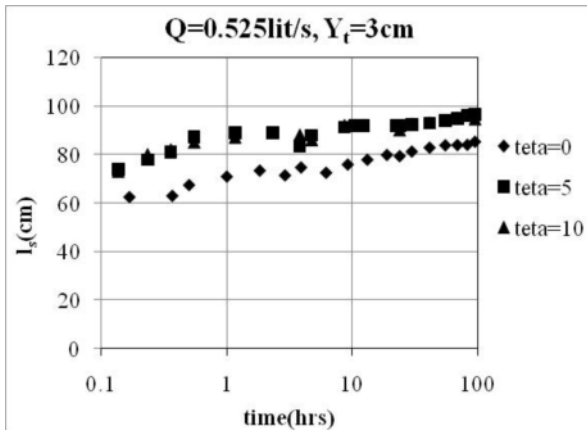
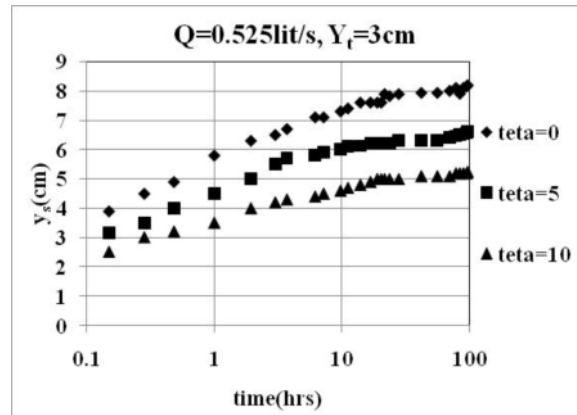
شکل ۴ تغییرات زمانی عمق حفره آبخستگی برای $Y_f=18\text{cm}$

نتایج به دست آمده با عمق پایاب برابر ۳ سانتی متر (شکل ۵) نشان می‌دهد که اگرچه مانند شرایط با عمق پایاب زیاد، با افزایش زاویه جت، زمان رسیدن حفره آبخستگی به شرایط تعادل کمتر است، اما در جت افقی پس از گذشت حدود ۲۴ ساعت از ابتدای آزمایش، حداکثر عمق حفره آبخستگی به ۸۵٪ عمق حفره آبخستگی در ۹۶ ساعت رسیده است. بنابراین در عمق‌های کم پایاب نیاز به افزایش زمان تعادل وجود داشت. لذا زمان تعادل حفره آبخستگی (مدت زمانی که عمق حفره آبخستگی به ۹۵٪ عمق حفره آبخستگی در ۹۶ ساعت برسد) برای جت‌های افقی ۵۰ ساعت و برای جت‌های مایل با زاویه‌های ۵ و ۱۰ درجه به ترتیب برابر ۳۵ و ۳۰ ساعت در نظر گرفته شد (شکل ۵).

برای جت‌های افقی در حالت $Y_f=18\text{cm}$ ، طول حفره آبخستگی پس از گذشت حدود ۲۴ ساعت از شروع آزمایش به ۹۵٪ طول حفره در آزمایش بلند مدت (۹۶ ساعت) می‌رسید. این زمان برای جت با زاویه‌های ۲۰، ۱۰ و ۵ درجه به ترتیب برابر ۵، ۱۵ و ۲۲ ساعت از ابتدای شروع آزمایش بود (شکل ۶).

انجام شده توسط Balachandar and Kells (1997) نشان داد که ابعاد حفره آبخستگی ایجاد شده توسط جت‌های دیواره‌ای دوبعدی پس از گذشت یک هفته از ابتدای آزمایشها نیز تغییر خواهد کرد. بسیاری از محققان از جمله Balachandar و Ade and Rajaratnam (1998) and Kells (1997) روش مشاهداتی را به عنوان روشی مناسب برای تعیین زمان تعادل انتخاب کردند. این محققان زمان تعادل حفره آبخستگی را زمانی در نظر گرفتند که ذرات درون حفره حرکت چندانی نداشته و ابعاد حفره آبخستگی با زمان تغییر زیادی نکنند.

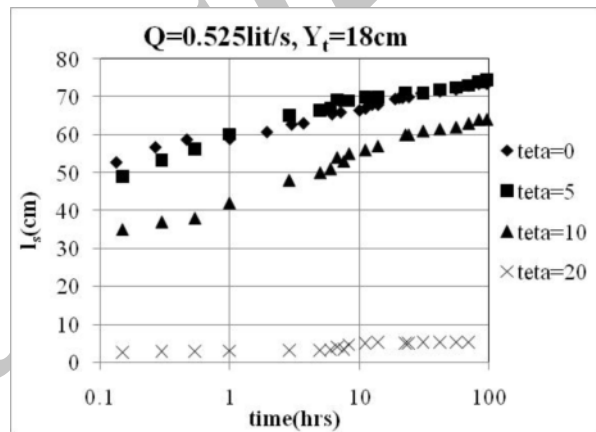
در تحقیق حاضر برای انتخاب زمان تعادل مناسب، تعدادی آزمایش طولانی مدت (۹۶ ساعت) برای شرایط مختلف حداکثر عدد فرود و حداکثر و حداقل عمق پایاب برای زاویه‌های مختلف جت انجام شد. نتایج نشان داد که ابعاد حفره آبخستگی با گذشت حدود ۹۶ ساعت از ابتدای آزمایش تغییر ناچیزی دارد. به عنوان نمونه در شرایطی که $\theta=0^\circ$ ، $Y_f=18\text{cm}$ و $Q=0.525\text{lit/s}$ باشد، در فاصله زمانی ۹۰ تا ۹۶ ساعت عمق حفره آبخستگی در حدود ۲ میلی متر تغییر داشت. بنابراین انتخاب ۹۶ ساعت به عنوان زمان انجام آزمایشهای طولانی مناسب است. در ادامه زمانی که ابعاد حفره به ۹۵٪ ابعاد حفره آبخستگی در ۹۶ ساعت می‌رسید، به عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شد. نتایج این آزمایشها نشان داد که برای جت‌های افقی با عمق پایاب برابر ۱۸ سانتی متر، زمان تعادل ۲۴ ساعت برای رسیدن حفره آبخستگی به شرایط تعادل کافی است و تقریباً پس از گذشت ۲۴ ساعت از ابتدای آزمایش، حداکثر عمق حفره آبخستگی به ۹۵٪ عمق حفره در ۹۶ ساعت می‌رسد. این زمان برای جت با زاویه‌های ۲۰، ۱۰ و ۵ درجه به ترتیب ۵ و ۷/۵ و ۱۵ ساعت بود (شکل ۴).

شکل ۷ تغییرات زمانی طول حفره آبشستگی برای $Y_t=3\text{cm}$ شکل ۵ تغییرات زمانی عمق حفره آبشستگی برای $Y_t=3\text{cm}$

علت این تفاوت را می‌توان اثر برآمدگی رسوبها در پایین‌دست حفره آبشستگی و جلوگیری این برآمدگی از انتقال مصالح به بیرون از حفره آبشستگی دانست. در حالت جت مایل به دلیل اینکه حجم مصالح خارج شده از حفره آبشستگی کمتر است حفره آبشستگی سریعتر به تعادل می‌رسد. همچنین طول حفره آبشستگی نسبت به عمق حفره آبشستگی دیرتر به تعادل می‌رسد. برای انجام آزمایشها در تحقیق حاضر، با توجه به آزمایشهای طولانی مدت، زمان مناسب برای حالت $Y_t=3\text{cm}$ ، برابر ۵۲ ساعت و برای حالت $Y_t=18\text{cm}$ ، برابر ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. برای بقیه آزمایشها از روش مشاهداتی برای رسیدن به زمان تعادل استفاده شد. حداقل زمان انجام آزمایشها برابر ۲۴ ساعت و حداکثر آن ۵۲ ساعت بود و این زمان با تغییر پارامترها (سرعت جت، عمق پایاب و زاویه جت) تغییر می‌کرد.

۵- سازوکار آبشستگی ناشی از جت‌های افقی

جریان خروجی نازل در لحظات نخست آبشستگی، با شدت زیادی ابعاد حفره آبشستگی را گسترش می‌دهد و مصالح با حرکتیایی غلتشی و لغزشی و بیشتر به شکل

شکل ۶ تغییرات زمانی طول حفره آبشستگی برای $Y_t=18\text{cm}$

نتایج نشان داد که برای جت‌های افقی با $Y_t=3\text{cm}$ ، مدت زمان لازم برای آنکه طول حفره آبشستگی به ۹۵٪ طول حفره در آزمایشهای بلند مدت (۹۶ ساعت) برسد بیشتر از زمانی است که $Y_t=18\text{cm}$ باشد. این زمان برای جت با زاویه‌های ۱۰ و ۵ و ۰ درجه به ترتیب برابر ۳۳، ۳۵ و ۵۲ ساعت است (شکل ۷).

بنابراین دیده می‌شود که زمان تعادل عمق و طول حفره آبشستگی با افزایش زاویه جت کاهش می‌یابد. علاوه بر این در حالت $Y_t=3\text{cm}$ ، زمان تعادل حفره آبشستگی نسبت به حالتی که $Y_t=18\text{cm}$ باشد، بیشتر است.

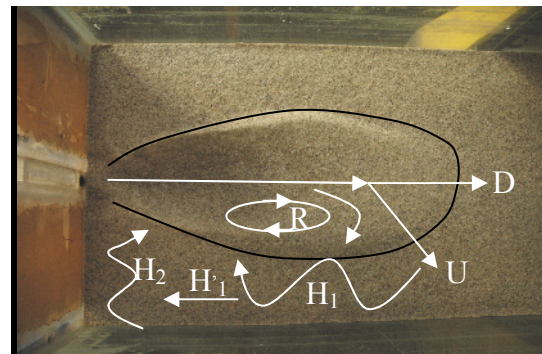
پایین دست حفره شده و با انتقال مصالح به پایین دست، طول برآمدگی افزایش می‌یابد. در شرایطی که $Y_1 > 3\text{cm}$ ، به دلیل امکان پخش بیشتر جت در راستای عمودی، جریان D ضعیف شده توانایی جابه‌جایی مصالح را نداشته و سطح برآمدگی تشکیل شده در پایین دست حفره هموار نیست.

جریان U بخشی از جریان خروجی حفره آبشستگی است که بر اثر برخورد به دیوار پایین دست حفره منحرف می‌شود. این بخش از جریان، پس از عبور از روی برآمدگی به صورت جریان چرخشی H_1 به سمت بالادست حرکت می‌کند. جریان H_1 در تعدادی از آزمایشها موجب آبشستگی در نزدیکی کناره دیوار کانال می‌شد (جدول ۲).

بر اثر این آبشستگی و برخورد جریان خروجی از حفره و ته‌نشین شدن مصالح خارج شده از حفره در کناره دیوار کانال، برآمدگی دومی در کناره دیوار کانال مشاهده می‌شود که ارتفاع آن با افزایش عدد فرود ذرات و کاهش عمق پایاب افزایش می‌یابد. وجود این برآمدگی دوم در آبشستگی ناشی از جت‌های افقی دیواره‌ای مربعی توسط Faruque et al. (2006) نیز گزارش شده و دلیل آن، ته‌نشین شدن مصالح خروجی از حفره آبشستگی بیان شده است. اگر چه در تحقیق حاضر با توجه به نسبت باز

شدگی $\frac{B}{D} = 29$ - که بیشتر از تحقیقات Faruque et al. (2006) است - انتظار تشکیل برآمدگی ثانویه وجود نداشت، اما بیشتر بودن عدد فرود ذرات و در نتیجه افزایش قدرت جریان حلزونی H_1 ، موجب می‌شود که هر دو عامل ته‌نشینی ذرات خارج شده از حفره و آبشستگی ایجاد شده بر اثر جریان حلزونی H_1 ، عامل ایجاد برآمدگی دوم در امتداد طولی حفره آبشستگی در آزمایشهای حاضر باشد. بخشی از جریان H_1 توسط جریان چرخشی R

ذرات معلق از نازل فاصله می‌گیرند. در شرایطی که $Y_1/D = 1.5$ باشد، با شروع آزمایش، جت به سمت یکی از دیوارهای کانال منحرف شده و موجب انحراف حفره آبشستگی می‌شود. پس از گذشت دو تا سه دقیقه از شروع آزمایش، مسیر حرکت جت به سمت وسط کانال تغییر می‌کند. انحراف مسیر حرکت جت در آغاز آزمایش، موجب نامتقارن شدن حفره آبشستگی در پلان می‌شود. انحراف مسیر حرکت جت در جت‌های افقی دیواره‌ای سه‌بعدی مستطیلی توسط Sarathi et al. (2008) نیز گزارش شده است. در شرایطی که $Y_1/D > 1/5$ بود، حفره آبشستگی به صورت کاملاً متقارن گسترش می‌یافت و شکل حفره آبشستگی در کل زمان انجام آزمایش متقارن بود. نتایج نشان داد که جریان خارج شده از حفره آبشستگی به دو بخش تقسیم می‌شود (جریان D و جریان U در شکل ۸).



شکل ۸ تقسیم بندی جریانهای مشاهده شده

جریان D قسمتی از جریان خروجی از حفره است که با عبور از روی برآمدگی در انتهای حفره به سمت پایین دست کانال حرکت می‌کند. این جریان موجب انتقال مصالح خارج شده از حفره به پایین دست می‌شود. در شرایطی که عمق پایاب کم باشد ($Y_1 = 3\text{cm}$) این جریان موجب آبشستگی و هموار شدن سطح برآمدگی

و مصالح خارج شده از حفرة آبشستگی بیشتر در کناره‌های طولی حفرة آبشستگی ته‌نشین می‌شوند. در این حالت ارتفاع برآمدگی تشکیل شده در کناره‌های حفرة آبشستگی بیشتر از ارتفاع برآمدگی در انتهای حفرة آبشستگی است. با گذشت ۳ تا ۴ دقیقه از شروع آبشستگی، مسیر حرکت جت به سمت امتداد طولی لوله جت تغییر مسیر می‌دهد. در نتیجه مصالح خارج شده از حفرة بیشتر به انتهای حفرة آبشستگی هدایت می‌شود. اگر عمق پایاب کم باشد ($Y_1/D < 1.5$) جت پس از برخورد با سطح آب، انرژی خود را از دست داده و مصالح همراه شده با جریان در انتهای حفرة ته‌نشین می‌شود. در شرایطی که عمق پایاب زیاد باشد ($Y_1/D > 1.5$) مصالح به نواحی دور از انتهای حفرة آبشستگی منتقل می‌شود. با افزایش زاویه جت، به دلیل انتقال بهتر جریان جت به پایین دست و تضعیف قدرت جت، جریان U (شکل ۸) تضعیف شده و در نتیجه امکان وقوع آبشستگی کناره دیوار طولی کانال، آبشستگی بالادست کانال و نیز تشکیل برآمدگی ثانویه کمتر می‌شود (جدول ۳).

در شرایطی که عدد فرود ذرات معادل $3/9$ بود، هیچ‌یک از فرایندهای آبشستگی جدول ۳ برای جت‌های مایل ایجاد نشد.

در جت‌های مایل، دو نوع حفرة آبشستگی (حفرة آبشستگی نوع ۱ و ۲) مشاهده شد. در حفرة آبشستگی نوع ۱، یک عمق حداکثر آبشستگی و در حفرة آبشستگی نوع ۲، دو عمق حداکثر آبشستگی متوالی (با عمقهای ys_1 , ys_2) مشاهده شد (شکل ۹). پروفیل نوع ۲ برای حفرة آبشستگی در شرایطی دیده شد که زاویه جت برابر 10° درجه و $Q=0.525 \text{ lit/s}$ و $Y_1 \leq 8 \text{ cm}$ بود. اما در شرایطی که $Q=0.382 \text{ lit/s}$ بود، با تضعیف جریانهای برگشتی برخورد کننده به سطح آب، این نوع حفرة آبشستگی فقط برای شرایط $Y_1=3 \text{ cm}$ مشاهده شد.

مکش شده و باعث ایجاد کمی آبشستگی در بالادست برآمدگی دوم می‌شود. بقیه جریان H_1 که با H_1' در شکل ۸ نمایش داده شده بر اثر برخورد با دیوار بالادست کانال، جریان چرخشی H_2 را به وجود می‌آورد که باعث ایجاد کمی آبشستگی در نزدیکی دیوار بالادست کانال می‌شود. با افزایش عدد فرود ذرات و کاهش عمق پایاب، به دلیل اثر سدکنندگی برآمدگی تشکیل شده در انتهای حفرة و در نتیجه تقویت جریان U، امکان آبشستگی در نزدیکی بالادست دیوارهای کانال، تشکیل برآمدگی دوم در طول کانال و آبشستگی در ابتدای برآمدگی افزایش می‌یابد (جدول ۲).

با گذشت چند ساعت از آزمایش در دیوار پایین دست حفرة آبشستگی نیز دیون‌هایی مشاهده شد. پدیده انفجار آشفته‌گی، موجب تخریب دیون‌ها شده که پخش دیون را در جهت‌های مختلف در پی دارد. تشکیل دیون‌ها به وسیله جریان جت و تخریب آنها به وسیله پدیده انفجار آشفته‌گی، فرایندی چرخشی بود که در ابعاد حفرة آبشستگی تأثیر چندانی نداشت. اگر چه در زمانهای اولیه، آبشستگی به شدت ادامه داشت و مصالح با حرکتی غلتشی و لغزشی از حفرة آبشستگی خارج می‌شد، اما با گذشت زمان، از سرعت آبشستگی کاسته شده و پدیده انفجار آشفته‌گی - که بیشتر در نیمه دوم طولی حفرة آبشستگی ایجاد می‌شد - موجب تغییر بسیار ناچیزی در ابعاد حفرة آبشستگی می‌شد.

۶- سازوکار آبشستگی ناشی از جت‌های مایل

در آغاز آزمایش جت مایل، فرایند آبشستگی نسبت به جت افقی ضعیف‌تر بوده و انتظار می‌رفت که ابعاد حفرة آبشستگی در شرایط تعادل حفرة آبشستگی کمتر از جت‌های مایل باشد. در ابتدای آزمایش جت‌های مایل، مسیر حرکت جت دارای نوسان به سمت دیوار کانال بوده

جدول ۲ فرایندهای آبشستگی مشاهده شده در جت افقی

آبشستگی در بالادست		آبشستگی در ابتدای برآمدگی اصلی		آبشستگی در نزدیکی دیوار کانال		تشکیل برآمدگی دوم		فرایند
9.3	12.8	9.3	12.8	9.3	12.8	9.3	12.8	عدد فرود عمق پایاب
								$Y_t/D=1.5$
								$Y_t/D=3$
								$Y_t/D=6$
								$Y_t/D=9$

جدول ۳ فرایندهای آبشستگی مشاهده شده در جت‌های مایل

آبشستگی در بالادست		آبشستگی در ابتدای برآمدگی اصلی		آبشستگی در نزدیکی دیواره کانال		تشکیل برآمدگی دوم		فرایند
$\Theta=20^\circ$								
9.3	12.8	9.3	12.8	9.3	12.8	9.3	12.8	عدد فرود عمق پایاب
								$Y_t/D=1.5$
$\Theta=10^\circ$								
								$Y_t/D=1.5$
								$Y_t/D=3$
$\Theta=5^\circ$								
								$Y_t/D=1.5$
								$Y_t/D=3$
								$Y_t/D=4$
								$Y_t/D=6$

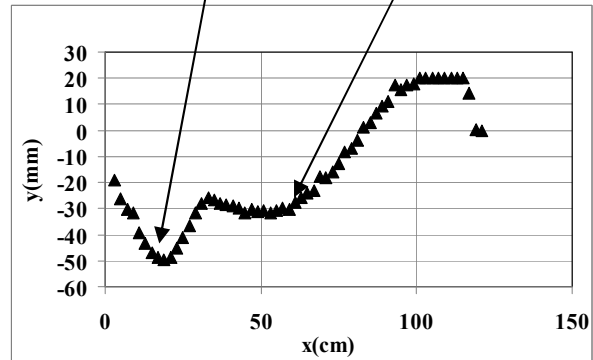
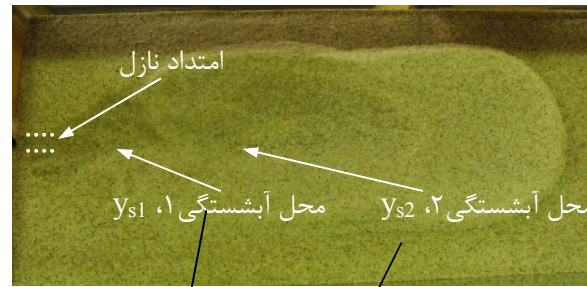
۷- بررسی پروفیل‌های طولی حفره آبشستگی

همان‌طور که پیشتر گفته شد، مشاهدات نشان داد که شدت آبشستگی ایجاد شده توسط جت‌های دیواره‌ای مایل کمتر از جت‌های افقی است. پروفیل‌های طولی حفره آبشستگی در زمان تعادل نیز این را تأیید می‌کند.

در شرایطی که زاویه جت برابر ۵ درجه بود فقط در حالت $Y_t=3\text{cm}$ برای $Q=0.382\text{ lit/s}$, 0.525 lit/s پروفیل نوع ۲ برای حفره آبشستگی مشاهده شد. در شرایطی که زاویه جت برابر ۲۰ درجه بود نیز فقط برای $Q=0.382\text{lit/s}$ و $Y_t=3\text{cm}$ این نوع حفره آبشستگی مشاهده شد.

اما این ابعاد حفره آبشستگی برای جت با زاویه ۱۰ درجه کاهش محسوسی یافته است. از سوی دیگر محل قرارگیری حداکثر عمق حفره آبشستگی برای جت‌های مایل با زاویه ۵ درجه نسبت به جت‌های افقی تغییر چندانی نکرده، اما برای جت‌های با زاویه ۱۰ و ۲۰ درجه به دهانه نازل نزدیکتر شده است. شکل ۱۱ نمونه‌ای از پروفیل‌های طولی نوع ۲ حفره آبشستگی را برای $\theta = 5^\circ, 10^\circ = \theta$ نشان می‌دهد.

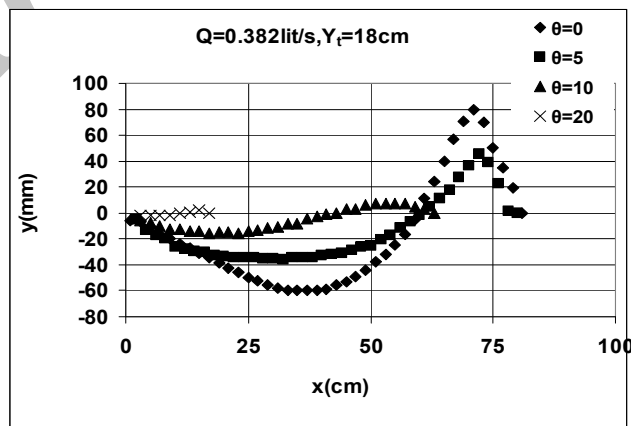
در شرایطی که عمق پایاب برابر ۳ سانتی‌متر باشد، عمق حفره آبشستگی و ارتفاع برآمدگی انتهای حفره آبشستگی در جت‌های مایل کمتر از جت افقی است، در حالی که طول حفره آبشستگی و فاصله محل قرارگیری انتهای برآمدگی حفره آبشستگی در جت‌های مایل بیشتر از جت‌های افقی است. پارامترهای مختلفی برای توصیف پروفیل‌های طولی بی‌بعد حفره آبشستگی نوع ۱ بررسی شد. از میان پارامترهای بررسی شده، حداکثر عمق آبشستگی برای بی‌بعد کردن عمق حفره آبشستگی در فواصل مختلف طولی و طول حفره آبشستگی برای بی‌بعدسازی فواصل نقاط مورد نظر تا دهانه نازل بهترین نتایج را ارائه کردند.



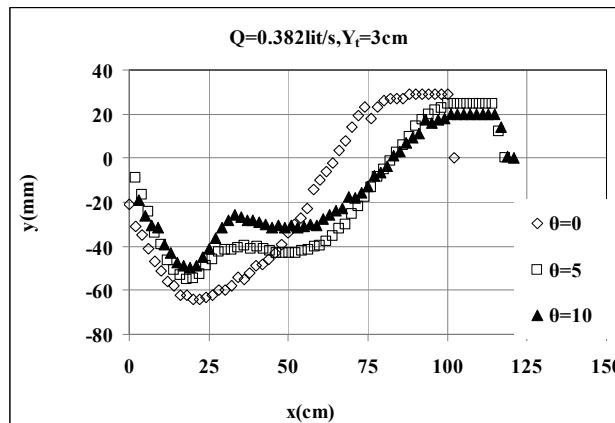
شکل ۹ پلان و پروفیل طولی حفره آبشستگی نوع ۲:

$$Q=0.382 \text{ lit/s}, Y_1=3 \text{ cm}, \theta=10^\circ$$

شکل ۱۰ نمونه‌ای از پروفیل‌های طولی نوع ۱ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اگر عمق پایاب برابر ۱۸ سانتی‌متر باشد، عمق حفره آبشستگی با افزایش زاویه جت کاهش می‌یابد. اگرچه تفاوت چندانی بین طول حفره آبشستگی و محل قرارگیری انتهای حفره آبشستگی برای جت با زاویه ۵ درجه و جت افقی وجود ندارد،



شکل ۱۰ پروفیل‌های طولی آبشستگی نوع ۱



شکل ۱۱ پروفیل‌های طولی آبشستگی نوع ۲

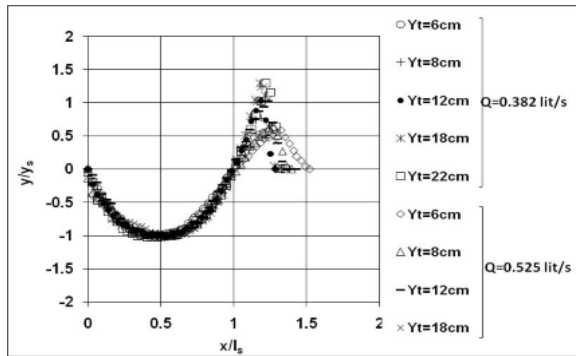
جت‌های افقی در شرایطی که $Fr_d=12.8$ ، برابر $Y_f/D=3$ است که تطابق خوبی با تحقیقات Ali and Lim (1986) دارد. عمق بهینه پایاب در آبشستگی توسط جت‌های مایل با زاویه‌های $5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ به ترتیب برابر $Y_f/D=6, 7, 8$ است (شکل ۱۳-الف).

حداکثر عمق حفره آبشستگی در جت‌های مایل نسبت به جت‌های افقی کمتر است. این اختلاف برای پایاب‌های بیشتر افزایش می‌یابد. اما در شرایط $Y_f/D=1.5$ و $Fr_d=12.8$ ، میزان کاهش در حداکثر عمق حفره آبشستگی در جت با زاویه 10° درجه نسبت به جت افقی 25% و میزان کاهش حداکثر عمق آبشستگی در شرایط $Y_f/D=9$ ، برابر 50% درصد است. دلیل این تغییر در پایاب‌های زیاد را می‌توان شرایط مناسب‌تر برای انتقال جت به پایین دست و پخش آن در عمق پایاب و در نتیجه اندرکنش کمتر جریان جت با سطح رسوبها دانست. در حالی که در عمق کم پایاب به دلیل محدود بودن عمق پایاب، پخش جریان جت در راستای عمق پایاب کمتر بوده و لذا جت، اندرکنش بیشتری با سطح رسوبها دارد. بنابراین اثر زاویه جت بر حداکثر عمق آبشستگی با افزایش عمق پایاب بیشتر می‌شود.

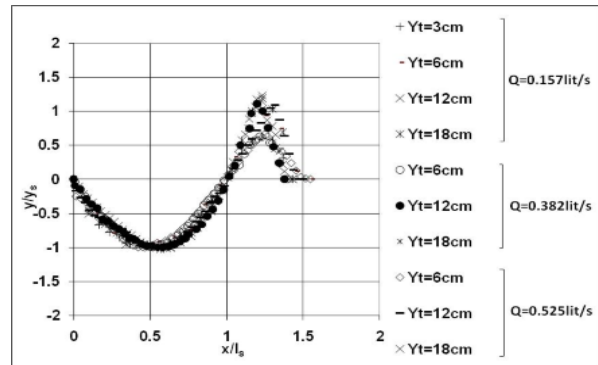
شکل‌های ۱۲(الف-د) پروفیل طولی حفره آبشستگی را برای زوایای مختلف جت مقایسه می‌کند. اگر $5^\circ, 0^\circ$ باشد نسبت ارتفاع برآمدگی در پایین دست حفره آبشستگی به عمق حفره، در محدوده 0.5 تا $1/2$ است. این نسبت برای شرایطی که $10^\circ, 20^\circ$ باشد کمتر از 0.5 است. محل قرارگیری حداکثر عمق حفره آبشستگی برای جت‌های افقی در حدود 0.6 طول حفره آبشستگی تا دهانه نازل فاصله دارد. اگر $5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ باشد این مقدار کمتر می‌شود، طوری که برای جت‌های 5° در فاصله 0.5 و برای جت‌های 10° و 20° به ترتیب 0.45 و 0.4 است. از سوی دیگر نسبت محل قرارگیری انتهای برآمدگی حفره آبشستگی به طول حفره آبشستگی با افزایش زاویه جت کمتر می‌شود.

۸- اثر پارامترهای مختلف بر ابعاد حفره آبشستگی

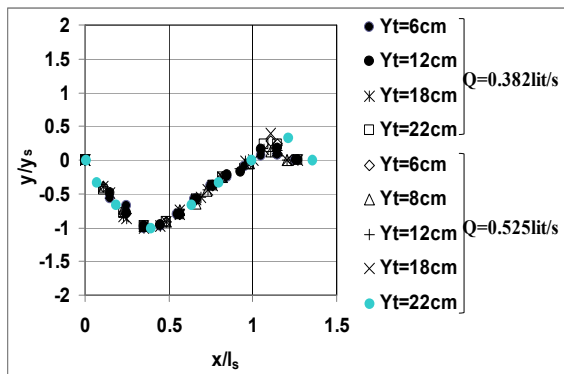
مطالعه حداکثر عمق آبشستگی در شرایط مختلف نشان داد که عمقی برای پایاب وجود دارد که "پایاب بهینه" نامیده می‌شود و افزایش و کاهش عمق پایاب نسبت به این مقدار بهینه، موجب افزایش حداکثر عمق آبشستگی در شرایط تعادل حفره آبشستگی می‌شود. این مقدار برای



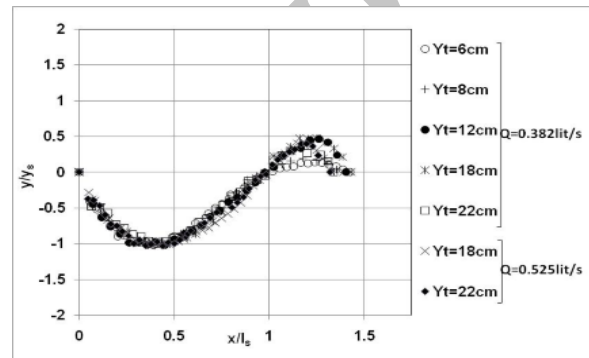
ب- $\theta=0^\circ$



الف- $\theta=0^\circ$



د- $\theta=20^\circ$



ج- $\theta=10^\circ$

شکل ۱۲ پروفیل‌های بی‌بعد شده حفره آبشستگی برای زاویه‌های مختلف جت

آب بدلیل پخش بیشتر جرم جت در عمق پایاب، تضعیف شده و در نتیجه آبشستگی با افزایش عمق پایاب به دلیل تضعیف این عامل آبشستگی (جریانهای برگشتی از سطح آب)، کاهش محسوسی می‌یابد. اما در جت‌های افقی بیشتر جرم جت در جهت افقی حرکت کرده و در نتیجه جریان برخورد کننده به سطح آب - که به سمت کف منحرف می‌شود- وجود ندارد، در نتیجه افزایش عمق پایاب تأثیر کمتری بر آبشستگی ناشی از جت‌های افقی دارد.

هم‌چنان‌که شکل ۱۳- الف نشان می‌دهد در جت‌های افقی تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق حفره آبشستگی تا شرایط $Y_t/D=6$ وجود دارد. با افزایش عمق پایاب از این

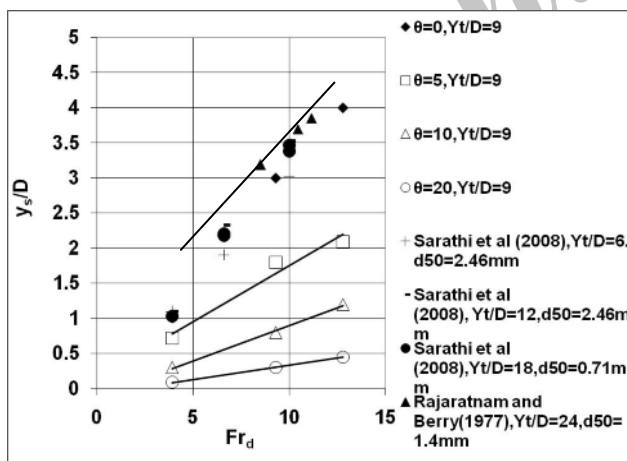
شکل (۱۳-الف) هم‌چنین نشان می‌دهد که وقتی جت مایل است تأثیر افزایش عمق پایاب بر حداکثر عمق حفره آبشستگی بیشتر می‌شود. به‌عنوان مثال اگر $\theta=10^\circ$ باشد با افزایش عمق پایاب از $Y_t/D=1.5$ به $Y_t/D=6$ حداکثر عمق حفره آبشستگی ۶۸٪ کاهش می‌یابد اما اگر جت افقی باشد، با افزایش عمق پایاب از $Y_t/D=1.5$ به $Y_t/D=3$ کاهش عمق حفره آبشستگی حدود ۱۳٪ است که دلیل آن را می‌توان چنین بیان کرد: در جت‌های مایل، به‌دلیل زاویه قرارگیری جت، بیشتر جرم جت به سمت سطح آب حرکت می‌کند و پس از برخورد به سطح آب (به‌ویژه در پایاب‌های کم) به سمت کف منحرف می‌شود. با افزایش عمق پایاب در جت‌های مایل جریانهای برگشتی از سطح

مقدار، تغییر چندانی در عمق حفره آبستگي ایجاد نمی‌شود. اما در جت‌های مایل، تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق حفره آبستگي تا $Y_t/D=9$ ادامه داشته و در صورت افزایش عمق پایاب از این مقدار تغییر چندانی در عمق حفره آبستگي ایجاد نمی‌شود. با کاهش عدد فرود ذرات به $Fr_d=3/9$ ، عمق‌های بهینه پایاب ارائه شده ($Y_t/D=6$ برای جت‌های افقی و $Y_t/D=9$ برای جت‌های مایل) تغییر چندانی نکرده و مستقل از عدد فرود در محدوده آزمایشگاهی این تحقیق قرار دارد. شکل ۱۳-ب نشان می‌دهد که عمق آبستگي با افزایش عدد فرود در تمامی زاویه‌های مورد مطالعه به صورت خطی افزایش و شیب این خطوط با افزایش زاویه جت کاهش می‌یابد.

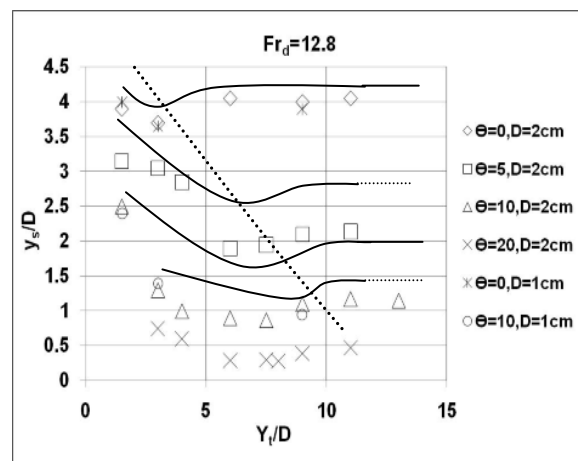
برای مقایسه تأثیر قطر مصالح و قطر نازل بر حداکثر عمق حفره آبستگي، نتایج به دست آمده از تحقیقات Sarathi et al. (2008) و Rajaratnam and Berry (1977) نیز به نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر برای جت‌های افقی

اضافه شده است. لازم است ذکر شود که قطر نازل در تحقیق Sarathi et al. (2008)، برابر $2/66$ سانتی‌متر و در تحقیق Rajaratnam and Berry (1977)، برابر $2/54$ سانتی‌متر بود. شکل ۱۳-ب نشان می‌دهد که همبستگی مناسبی بین داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر و نتایج این محققان برای مقادیر مختلف قطر مصالح و نازل وجود دارد. همچنین شکل ۱۳-ب نشان می‌دهد که نسبت عمق بهینه پایاب ارائه شده ($Y_t/D=6$) برای جت‌های افقی با داده‌های سایر محققان تایید می‌شود.

طول حفره آبستگي l_s و محل قرارگیری انتهای برآمدگی حفره آبستگي l_h در جت‌های مایل در شرایط $Fr_d=12/8$ و $Y_t/D=1/5$ نسبت به جت‌های افقی بیشتر است (شکل‌های ۱۴-الف و ۱۵-الف). بیشتر بودن طول حفره آبستگي و محل قرارگیری انتهای برآمدگی در جت‌های مایل نسبت به جت‌های افقی، برای شرایطی که $Fr_d=9/3$ و $Y_t/D=1/5$ باشد نیز مشاهده شد که در این مقاله نتایج آن ارائه نشده است.

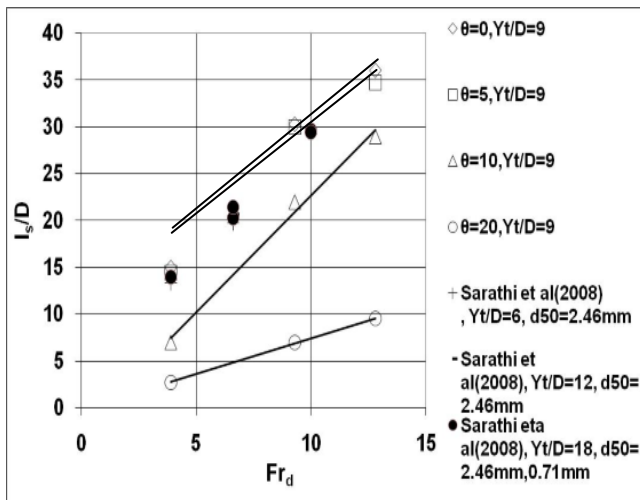


(ب)

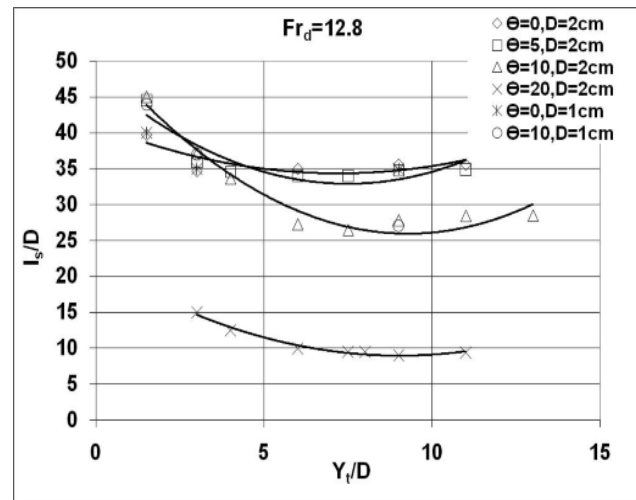


(الف)

شکل ۱۳ تغییرات عمق حفره آبستگي با زاویه جت و عمق پایاب

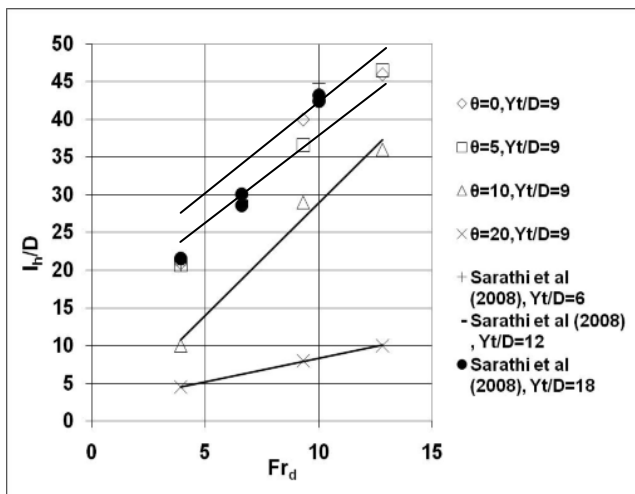


(ب)

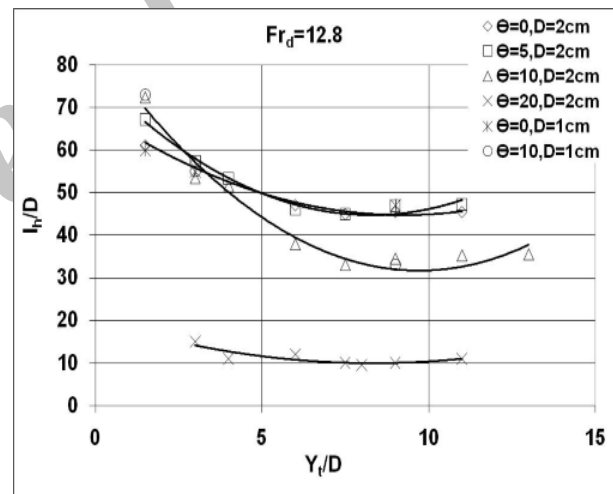


(الف)

شکل ۱۴ تغییرات طول حفره آبشستگی با زاویه جت و عمق پایاب



(ب)



(الف)

شکل ۱۵ تغییرات محل قرارگیری انتهای برآمدگی با زاویه جت و عمق پایاب

الف و ۱۵-الف). برای شرایطی که $3 < Y_t/D < 4$ باشد تغییر I_h و I_s با تغییر زاویه جت بین $0^\circ < \theta < 10^\circ$ چندان محسوس نیست. شکل‌های ۱۴-ب و ۱۵-ب نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود ذرات، طول حفره آبشستگی و محل قرارگیری انتهای برآمدگی نیز افزایش

تحقیق حاضر نشان می‌دهد که طول حفره آبشستگی در شرایط $Y_t/D=1/5$ در جت‌های مایل بیشتر از جت‌های افقی است. طول حفره آبشستگی و محل قرارگیری انتهای برآمدگی با تغییر زاویه جت ($\theta=0^\circ$ و $\theta=5^\circ$) در شرایطی که $Y_t/D > 1/5$ باشد تغییر چندانی نمی‌کند (شکل‌های ۱۴-

نزدیکی دیوارها بر اثر جریانهای خروجی حفره آبستگي (جریانهای H_1 و H_2)، عرض حفره آبستگي مشخص نبوده است که در شکل ۱۶- الف این نقاط از نمودارها حذف شد.

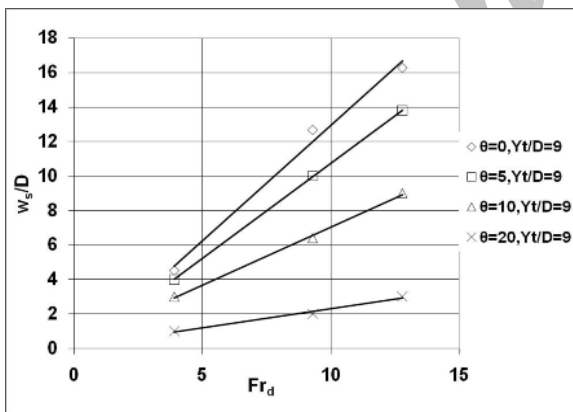
شکل ۱۷ نشان می‌دهد که ابعاد حفره آبستگي با افزایش زاویه جت کاهش می‌یابد. با توجه به شکل‌های ۱۳-۱۷ می‌توان گفت که به‌جز در شرایطی که عمق پایاب $Y_f/D=1/5$ باشد، افزایش زاویه جت موجب افزایش I_s ، I_h می‌شود.

همچنین اگر زاویه جت برابر ۵ درجه باشد I_s ، I_h نسبت به جت‌های افقی تغییر چندانی ندارد. همچنین در شرایطی که $3 < Y_f/D < 4$ باشد، تفاوت چندانی بین I_s ، I_h با تغییر زاویه جت بین $0^\circ < \theta < 10^\circ$ وجود ندارد. در سایر شرایط بررسی شده در این تحقیق، ابعاد حفره آبستگي در جت‌های مایل کمتر از جت‌های افقی است. بنابراین از جت‌های دیواره‌ای مایل به‌عنوان یکی از گزینه‌های کاهش ابعاد حفره آبستگي، به‌ویژه عمق حفره آبستگي می‌توان استفاده کرد.

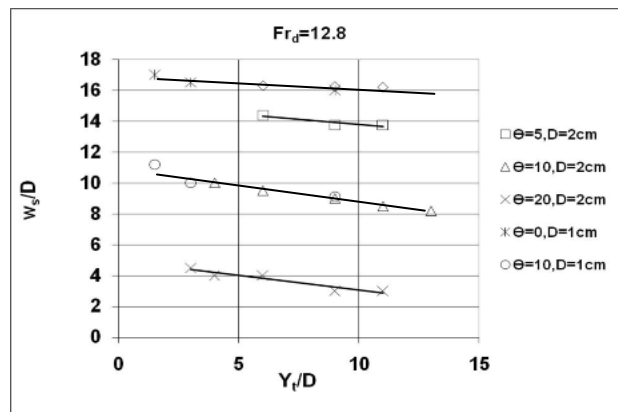
می‌یابد که این نشان دهنده افزایش توانایی جت برای آبستگي در اعداد فرود بزرگتر است. با مقایسه طول حفره آبستگي I_s و محل قرارگیری انتهای برآمدگی I_h در شرایط $\theta=20^\circ$ به دلیل ابعاد بسیار کم حفره آبستگي از یک سو و همچنین توانایی زیاد جت برای انتقال مصالح خارج شده از حفره به نقاط دورتر از دهانه نازل، اختلاف چندانی بین طول حفره آبستگي و محل قرار گیری انتهای برآمدگی در اعماق پایاب مورد مطالعه دیده نشد.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه جت عرض حفره آبستگي کاهش و با افزایش عدد فرود ذرات عرض حفره آبستگي افزایش می‌یابد (شکل ۱۶ الف و ب). عرض حفره آبستگي با افزایش عمق پایاب روندی کاهشی دارد.

در شرایط $Fr_d=4/3$ ، $Fr_d=12/8$ ، $Y_f/D=1/5$ و $\theta=0^\circ$ ، $\theta=5^\circ$ و $\theta=10^\circ$ توسعه حفره آبستگي در راستای عرضی زیاد بوده و حفره آبستگي به کناره‌های دیوار کانال می‌رسید. در چنین شرایطی به دلیل آبستگي در



(ب)



(الف)

شکل ۱۶ تغییرات عرض حفره آبستگي با زاویه جت و عمق پایاب

پارامترهای آبشستگی، ϕ_{cave} میانگین مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای آبشستگی می‌باشد.

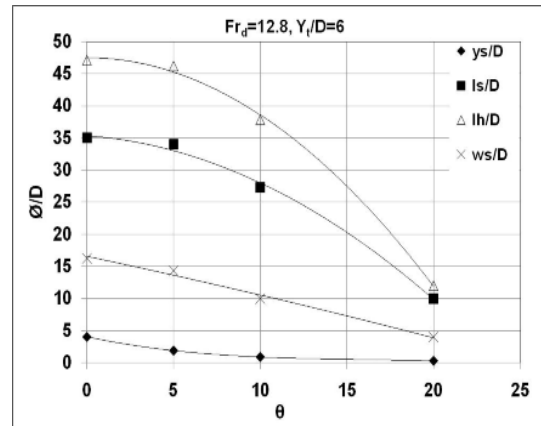
برای استخراج روابط مناسبی برای تخمین پارامترهای آبشستگی ناشی از جت‌های دیواره‌ای افقی، از داده‌های Sarathi et al. (2008) و Ade and Rajaratnam (1998) نیز استفاده شد. در تحقیق Ade and Rajaratnam (1998) اطلاعات w_s ارائه نشده است. با استفاده از کل داده‌های موجود، بهترین مقادیر برای a ، b ، c و d برای جت‌های افقی و مایل محاسبه و به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. شکل‌های ۱۸- الف و ب نمایش‌دهنده مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده برای حداکثر عمق نسبی حفره آبشستگی برای جت‌های افقی و مایل است. برای جت‌های افقی آخرین جزء معادله (یعنی θ) از رابطه ۴ حذف می‌شود.

جدول ۴ مقادیر a ، b ، c و d برای جت‌های افقی در رابطه ۴

ضرایب متغیر	a	b	c	ER	R ²
y_s	۰/۳۱	۰/۹۶	-۰/۰۳۵	%۲۰	۰/۹
w_s	۱/۶۲	۱	-۰/۰۸	%۲۱	۰/۹
l_s	۴/۷۱	۰/۸۲	-۰/۰۲	%۶	۰/۹۶
l_h	۷/۹	۰/۷۲	-۰/۱۴	%۲۰	۰/۹۴

جدول ۵ مقادیر a ، b ، c و d برای جت‌های مایل در رابطه ۴

ضرایب متغیر	a	b	c	d	ER	R ²
y_s	۰/۰۷	۰/۴۸	-۰/۲۲	-۱/۱	%۲۰	۰/۹
w_s	۰/۲۴	۰/۸۸	-۰/۸۸	-۰/۱۷	%۱۴/۴	۰/۹۴
l_s	۲/۳	۰/۴۱	-۰/۱۹	-۰/۸۸	%۲۶	۰/۸۵
l_h	۱/۱۲	۰/۶۲	-۰/۲۱	-۱/۱۵	%۲۲	۰/۸۵



شکل ۱۷ تغییر ابعاد حفره آبشستگی با زاویه جت

۹- ارایه روابطی برای تخمین ابعاد حفره آبشستگی

بررسی نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که می‌توان ارتباطی را بین پارامترهای آبشستگی به صورت توانی در نظر گرفت و در نتیجه رابطه (۳) را به صورت رابطه (۴) می‌توان فرض کرد:

$$\frac{\phi}{D} = a \times Fr_d^b \times \left(\frac{Y_1}{D}\right)^c \times \theta^d \quad (4)$$

که در آن a ، b ، c و d مقادیری تجربی است که با استفاده از داده‌های آزمایشی به دست می‌آید. این مقادیر بر اساس روش کمترین میانگین قدرمطلق خطاها (ER) و حداکثر مجذور ضریب همبستگی (R^2) بین مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی به دست می‌آید (روابط ۵ و ۶).

$$ER = \frac{|\phi_m - \phi_c|}{\phi_m} \times 100 \quad (5)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum (\phi_m - \phi_{mave}) \times (\phi_c - \phi_{cave})}{\sqrt{\sum (\phi_m - \phi_{mave})^2 \times \sum (\phi_c - \phi_{cave})^2}} \right]^2 \quad (6)$$

در اینجا: ϕ_m مقادیر اندازه‌گیری شده برای پارامترهای آبشستگی، ϕ_c مقادیر محاسبه شده برای پارامترهای آبشستگی، ϕ_{mave} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده برای

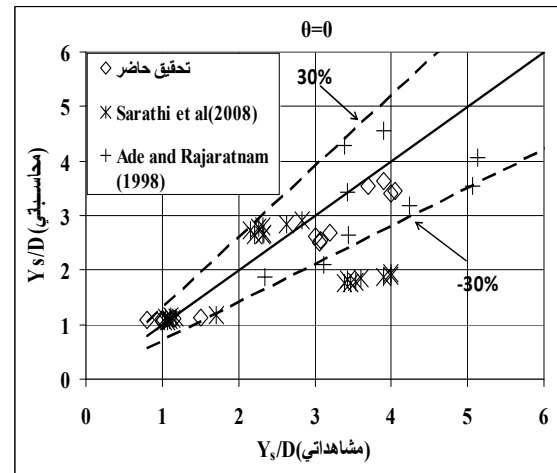
قبلی است. با توجه به نبود رابطه‌ای برای تخمین ابعاد حفره آبستگي جت‌های مایل، ارزیابی روابط ارائه شده برای این نوع جت‌ها انجام نشد.

جدول ۶ تعدادی از روابط ارائه شده برای جت‌های افقی توسط سایر محققان

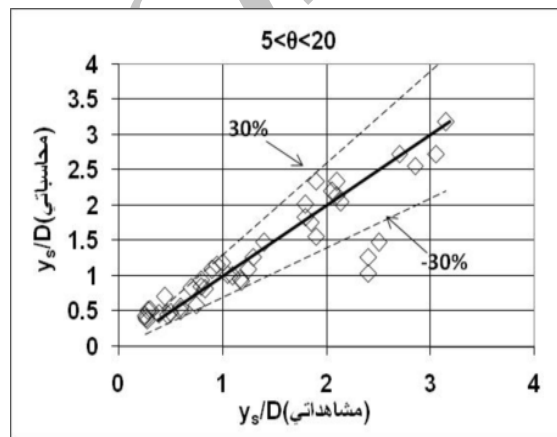
رابطه	محقق
$\frac{y_s}{D} = 0.41 \times F_{rd} - 0.067$	Rajaratnam and Diebel (1981)
$\frac{y_s}{D} = 0.5 \times (F_{rd} + 1)$	Ade and Rajaratnam (1998)
$\left(\frac{y_s}{R^{0.75} \times d_{50} \times F_{rd}^{0.65}}\right) = 3.71$	Faruque et al. (2004)
$\frac{y_s}{D} = 2.55 \times \ln(F_{rd}) - 2.44$	Sarathi et al. (2008)
$\frac{y_s}{Y_t} = 3 \times 10^{-5} \times \left(\frac{F_{rd} \times \left(\frac{B}{D}\right)^{0.1}}{\left(\frac{Y_t}{D}\right)}\right)^3$ $- 3.3 \times 10^{-3} \times \left(\frac{F_{rd} \times \left(\frac{B}{D}\right)^{0.1}}{\left(\frac{Y_t}{D}\right)}\right)^2$ $+ 0.285 \times \left(\frac{F_{rd} \times \left(\frac{B}{D}\right)^{0.1}}{\left(\frac{Y_t}{D}\right)}\right)$	Sui et al. (2008)

۱۰- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر سازوکار آبستگي توسط جت‌های افقی و مایل بررسی و اثر دیواره کانال بر این سازوکار با توجه به تشکیل جریانهای H_1, H'_1, H_2, R در جت‌های افقی توصیف شد.



الف- جت افقی



ب- جت مایل

شکل ۱۸ مقایسه حداکثر عمق نسبی حفره آبستگي

روابط مختلفی برای تعیین ابعاد حفره آبستگي ناشی از جت‌های دیواره‌ای سه‌بعدی توسط محققین قبلی به‌دست آمده که تعدادی از آنها در جدول ۶ ارائه شده است. به‌منظور ارزیابی دقت روابط به‌دست آمده در این تحقیق، مقایسه‌ای بین ER و R^2 ناشی از رابطه ۴ و برخی از روابط قبلی برای عمق آبستگي با استفاده از داده‌های به‌دست آمده در این تحقیق و داده‌های محققان قبلی در جدول ۷ آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که دقت رابطه (۴) بهتر از روابط ارائه شده توسط محققان

جدول ۷ مقایسه نتایج روابط محققین قبلی (جت‌های

دیواره‌ای افقی) و رابطه (۴) برای Y_s

R ²	ER(%)	پارامتر آماری محقق
۰/۹۴	۴۱	Rajaratnam and Diebel (1981)
۰/۹۴	۵۵	Ade and Rajaratnam (1998)
۰/۰۹	۸۵	Faruque et al.(2004)
۰/۰۶	۳۳	Sarathi et al.(2008)
۰/۹۴	۳۰	Sui et al.(2008)
۰/۹۴	۱۹	تحقیق حاضر

تأثیر عمق پایاب بر عمق حفره آبشستگی برای شرایط $Y_t/D > ۹$ کم است.

۶- به جز طول حفره آبشستگی و محل قرارگیری انتهایی برآمدگی - که در شرایط $Y_t/D = ۱/۵$ در جت‌های مایل نسبت به جت‌های افقی بیشتر بود- در شرایطی که $۳ < Y_t/D < ۴$ باشد تفاوت چندانی بین l_s , l_h با تغییر زاویه جت در محدوده $0 < \theta < 10^\circ$ وجود ندارد. در سایر شرایط ابعاد حفره آبشستگی در جت‌های مایل، کمتر یا برابر جت‌های افقی بود.

۷- از جت‌های مایل به‌عنوان گزینه‌ای برای کاهش ابعاد حفره آبشستگی می‌توان استفاده کرد.

۸- روابطی برای تخمین پارامترهای حفره آبشستگی در جت‌های مایل و افقی ارائه شد که نتایج مناسب‌تری را نسبت به تحقیقات قبل به‌دست می‌دهد.

فرایندهای آبشستگی ایجاد شده در اطراف حفره آبشستگی (آبشستگی بالادست، آبشستگی ابتدای برآمدگی و آبشستگی نزدیک دیوار کانال) نیز با توجه به وجود این جریانها تحلیل شد. مهمترین نتایج به‌دست آمده عبارت است از:

۱- افزایش عدد فرود ذرات و نیز کاهش عمق پایاب و کاهش زاویه جت، امکان ایجاد هریک از فرایندهای آبشستگی جدول‌های ۲ و ۳ افزایش می‌یابد.

۲- پروفیل طولی حفره آبشستگی در جت‌های افقی، فقط یک عمق حداکثر آبشستگی و در جت‌های مایل در بعضی از شرایط آزمایش، دو عمق آبشستگی دارد.

۳- زمان تعادل برای حفره آبشستگی ایجاد شده در جت‌های مایل کمتر از جت‌های افقی است.

۴- یک عمق بهینه پایاب برای جت‌ها وجود دارد که افزایش و کاهش عمق پایاب نسبت به آن، موجب افزایش حداکثر عمق حفره آبشستگی می‌شود. این عمق برای محدوده آزمایشهای این تحقیق با افزایش زاویه جت و عدد فرود ذرات افزایش می‌یابد.

۵- در جت‌های افقی اگر عدد فرود معادل $۳/۹$ و $۱۲/۸$ باشد، تأثیر عمق پایاب بر حداکثر عمق آبشستگی برای شرایط $Y_t/D > ۶$ کم است. در حالی که در جت‌های مایل

۱۱- فهرست علائم

B	عرض کانال
D	قطر نازل
d_{50}	قطر میانگین ذرات
Fr_d	عدد فرود مصالح
G	شتاب گرانش زمین
l_s	طول حفره آبشستگی
l_h	محل قرارگیری انتهایی تلماسه نسبت به دیواره بالادست
Q	دبی جت
V	سرعت جت
w_s	عرض حفره آبشستگی
Y_s	عمق حفره آبشستگی
Y_t	عمق پایاب
P	چگالی آب
ρ_s	چگالی ذرات رسوب
θ , teta	زاویه جت دیواره‌ای نسبت به افق

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), pp. 575-580.

Lim, S.Y. (1995). "Scour below un-submerged full flowing culvert outlets", *Proceedings, Institution of Civil Engineers, London*, 112, pp. 136-149.

Lim, S. Y. and Chin, C. O. (1992). "Scour by circular wall jets with non-uniform sediments", *Advances in Hydro-science and Engineering*, 1, pp. 1989-1994.

Rajaratnam, N. and Aderibigbe, O. (1993). "A method for reducing scour below vertical gate", *Proceedings, Institution of Civil Engineers, London*, 101, pp. 73-83.

Rajaratnam, N. and Berry, B. (1977). "Erosion by circular turbulent wall jets", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 15(3), pp. 277-289.

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 wall jets", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 46 (2), pp. 158-175.

Sui, J., Faruque, M. A. A. and Balachandar, R. (2008). "Influence of channel width and tailwater depth on local scour caused by square jets", *Journal of Hydro-Environment Research.*, 2(1), pp. 39-45

 v

لزجت سینماتیکی آب

 σ_g

انحراف معیار دانه بندی مصالح

 \emptyset

یکی از ابعاد حفرة آبشستگی

۱۲- منابع

Ade, F., and Rajaratnam, N. (1998). "Generalized study of erosion by circular horizontal turbulent jets", *Journal of Hydraulic Research*, 36(4), pp. 613-635.

Ali, K.H.M. and Lim, S.Y. (1986). "Local scour caused by submerged wall jets", *Proceedings, Institution of Civil Engineers, London*, 81 (2), pp. 607-645.

Balachandar, R. and Kells, J.A. (1997). "Local channel scour in uniformly graded sediments: the time-scale problem", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 24(5), pp. 799-807.

Dey, S. and Sarkar, A. (2006). "Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 132(3), pp. 246-257.

Dey, S. and Sarkar, A. (2004). "Review on local scour due to jets", *International Journal of Sediment Research*, 19(3), pp. 210-238.

Emami, S. and Schleiss, A. (2006). "Design of erosion protection at diversion tunnel outlets with concrete prisms", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(1), pp. 81-92.