

## تأثیر نشت رو به بالا بر میزان عمق آبشستگی در پائین دست جت‌های قائم آزاد

محمود شفاعی بجنستان<sup>۱</sup> و سید مجتبی رضوی نبوی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۵/۱۲

<sup>۱</sup> استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهیدچمران اهواز

<sup>۲</sup> دکتری سازه‌های آبی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m\_shafai@yahoo.com

### چکیده

در این تحقیق، تأثیر نشت روبه بالا بر میزان آبشستگی پائین دست جت‌های عمودی نظیر سازه کنترل شیب مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. برای رسیدن به اهداف تحقیق دو سری آزمایش بدون و با وجود نشت رو به بالا در موسسه تحقیقات آب انجام گرفت. از سه نوع اندازه رسوب بستر و برقراری سه مقدار دبی مختلف و تحت شرایط سه عمق مختلف پایاب استفاده شد. میزان پنج بار آبی مختلف برای ایجاد دبی‌های نشت رو به بالا از ۱/۵ تا ۱۰/۵ لیتر بر ثانیه در سری آزمایش‌های دوم اعمال شد. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان نشت از بستر باعث کاهش حداکثر عمق آبشستگی می‌شود و میزان کاهش بستگی به اندازه مصالح رسوبی، عمق پایاب و دبی نشت رو به بالا دارد. نتایج حاصل با نتایج تحقیقی که بر روی جت‌های افقی قبلاً انجام شده است مقایسه گردید و نشان داده شد که نتایج این تحقیق با نتایج قبلی که بر روی جت افقی بدون کف بند افقی انجام شده است، بدلیل مشابهت الگوی جریان، منطبق ولی با نتایج بر روی جت افقی با کف بند متفاوت است. به منظور بررسی تحلیل نتایج، اندازه گیری مولفه های سه بعدی سرعت در دو حالت با و بدون وجود نشت رو به بالا درون حفره آبشستگی انجام گردید. ترسیم مولفه عمودی سرعت جریان نشان داد که مولفه‌ی رو به پائین سرعت در نزدیکی بستر در شرایط نشت می‌تواند تا ۴۷ درصد کاهش یابد و این باعث کاهش نیروی بالابرنده و در نتیجه کاهش ابعاد حفره آبشستگی می‌گردد. در این تحقیق روابطی برای تعیین عمق حفره آبشستگی در شرایط با وجود نشت رو به بالا ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: چاله فرسایشی، سازه کنترل شیب، سرریز، دبی نشت

## Effects of Upward Seepage on Scour Depth Downstream of the Free Falling Jets

M Shafai Bejestan<sup>\*1</sup> and SM Razavi Nabavi<sup>2</sup>

Received: 10 April 2013 Accepted: 3 August 2013

<sup>1</sup>Prof., Shahid Chamran univ., Ahwaz, Iran

<sup>2</sup>Ph.D. in Hydraulic structure, Iranian Water Resource management Company, Ministry of Power. Iran

\* Corresponding Author Email: m\_shafai@yahoo.com

### Abstract

In the present study the effect of upward seepage on scour depth downstream of the vertical jet such as grade control structure has been experimentally investigated. To reach such goal two series of tests without and with the presence of upward seepage using three different sediment sizes, three different flow discharges and three different tailwater depths were carried out at the hydraulic laboratory of Water Research Organization. For the second series of tests five different upward seepage discharges ranged from 1.5 to 10.5 liters per second were applied. The resulting data showed that by applying upward seepage, the scour depth decreased. The amount of decrease was found to be dependent on the sediment size, tailwater depth and upward seepage discharge. The rate of decrease for higher seepage discharge, lower tailwater depth and small particle size was high. The present results were compared with the results of previous research on horizontal jet without horizontal apron and was found in good agreement due to flow pattern similarity while our results were in disagreement with the results of previous research on horizontal jet with horizontal apron. To find the reason, three components of flow velocities inside the scour hole were measured using a Magnetic Doppler velocity meter for both cases of with and without upward seepage. The plots of the vertical flow velocity component showed that when the upward seepage was applied, the down flow velocity near the bed decreased up to 47%. The decrease of this velocity component could cause the lift force to decrease which eventually could reduce the scour depth. Relations for scour depth prediction under the effect of upward seepage were presented.

**Keywords:** Grade control structure, Scour hole, Seepage discharge, Spillway

پائین، به سمت بستر، حرکت می‌کنند در برخورد با  
بستر به سمت لایه‌های بالا تغییر جهت داده و به سمت

مقدمه

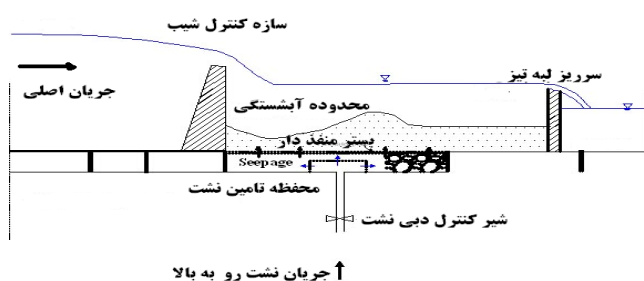
جت‌های عمودی سبب تشکیل جریان‌های سه  
بعدی می‌شوند. آن بخش از بردارهای سرعت که روبه

الگوریتم ژنتیک رابطه‌ای ارائه نمودند. گون و گوال (۲۰۰۸) نیز برای ابعاد چاله فرسایشی پائین دست سازه کنترل شیب روابطی ارائه نمودند. اسکورلاک و همکاران (۲۰۱۱) نیز در مقیاس بزرگ آزمایش‌های انجام دادند و روابطی برای ابعاد حفره‌ی آبستگی پائین دست سازه کنترل شیب ارائه نمودند. مهرآئین و همکاران (۱۳۸۹) اثر غیر یکنواختی ذرات رسوبی را عمق آبستگی بررسی نمودند و رابطه‌ای ارائه نمودند، مومنی و صالحیان و همکاران (۱۳۸۷) نیز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی رابطه کلی ارائه نمودند. رضوی نبوی و همکاران (۱۳۹۱) نیز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی جدید معادله‌ای ارائه نمودند همچنین از مقایسه تمام روابطی که تا این زمان ارائه شده‌است نتیجه گرفتند که رابطه دی آگوستینو و فررو (۲۰۰۴) هم از جامعیت بیشتری برخوردار است و هم اینکه به نتایج آزمایشگاهی بسیار نزدیک است. در تمام مطالعات فوق تاثیر نشت رو به بالا که معمولاً در سازه‌های کنترل شیب در اثر اختلاف سطح آب بالا و پائین دست سازه و یا به دلیل اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی اطراف رودخانه با سطح آب درون رودخانه بوجود می‌آید مورد بررسی قرار نگرفته است. تاثیر نشت رو به بالا موضوعی بوده‌است که توسط محققین مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است از جمله می‌توان به بررسی تاثیر آن بر آستانه حرکت ذرات توسط چنگ و چیو (۱۹۹۸a، b) دی و همکاران (۱۹۹۹)، دی و زانکه (۲۰۰۴)، دی و چنگ (۲۰۰۵) اشاره کرد. چنگ و چیو (۱۹۹۸b) نشان دادند که نشت رو به بالا باعث افزایش مولفه‌ی سرعت طولی جریان می‌گردد. چنگ و چیو (۱۹۹۹) نیز نشان دادند که سرعت آستانه حرکت ذرات رسوبی با حضور نشت رو به بالا کاهش می‌یابد. دی و زانکه (۲۰۰۴) مدلی برای تعیین آستانه حرکت ذرات رسوب ارائه دادند و صحت مدل خود را با داده‌های چنگ و چیو (۱۹۹۹) تایید کردند. دی و چنگ (۲۰۰۵) مدل توزیع تنش برشی رینولدزی را با حضور نشت رو به بالا در جریان غیر ماندگار غیریکنواخت بوجود آوردند و نشان دادند که توزیع تنش‌های رینولدزی بطور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر نشت رو به بالا قرار

بالا حرکت می‌کنند. در این شرایط نیروی بالابرنده<sup>۱</sup> به ذرات بستر اعمال شده و باعث بلند کردن ذرات در آن محل می‌شود. بردارهای سرعت همسو با بستر نیز ذرات رسوبی را به اطراف و بخصوص پائین دست در مسیر جریان اصلی حمل می‌کنند. با توجه به قدرت زیاد گردابه‌های رو به بالا، نرخ جابجائی رسوبات بسیار زیاد است به طوری که در مدت کوتاهی حفره‌ای در بستر آبرفتی و در محدوده سازه تشکیل خواهد شد. افزایش ناگهانی عمق حفره باعث کاهش قدرت گرداب در نزدیک بستر می‌شود که در نتیجه با افزایش زمان از نرخ جابجائی ذرات کاسته می‌شود و زمانی می‌رسد که نرخ خارج شدن ذرات بسیار کاهش می‌یابد. یکی از سازه‌های متقاطع رودخانه که به منظور کاهش شیب رودخانه بخصوص در رودخانه‌های کوهستانی و با هدف کاهش انتقال رسوب بستر و یا در بستر کانال‌های خاکی به منظور کاهش سرعت جریان و در نتیجه جلوگیری از فرسایش آن مورد استفاده قرار می‌گیرد، سازه کنترل شیب می‌باشد. هر ساله تعداد زیادی از این سازه‌ها در اثر آبستگی پائین دست آن تخریب می‌شوند. برای کاهش ریسک تخریب این سازه ضروری است تا میزان عمق آبستگی قبلاً پیش‌بینی گردد تا سازه با توجه به این موضوع طراحی شود. تاکنون مطالعات زیادی در این رابطه انجام شده است که منجر به ارائه معادلات نیمه تجربی و یا تجربی زیادی شده‌است. ماسون و آروموگان (۱۹۸۵) معادلات زیادی را که تا آن زمان برای تعیین عمق آبستگی پائین دست جت‌های قائم استخراج شده بودند با هم مقایسه و رابطه‌ای کلی با استفاده از آنالیز ابعادی استخراج کردند. برمن و ژولین (۱۹۹۱) و شفافی بچستان و آلبرتسون (۱۹۹۱) نیز با بکاربردن تئوری جت تلاش نمودند تا رابطه‌ی نیمه تجربی ارائه نمایند. دی آگوستینو و فررو (۲۰۰۴) با بکار بردن نظریه خود تشابهی و استفاده از داده‌های آزمایشگاهی متعددی رابطه‌ای ارائه کردند. عظمت الله و همکاران (۲۰۰۵) نیز با استفاده از داده‌های سایر محققین و بکاربردن

<sup>1</sup> Lift force

شکل ۱ شمائی از مقطع فلوم را نشان می‌دهد. قبل از هر آزمایش ذرات رسوبی به ضخامت ۲۶ سانتی‌متر بر روی کف فلوم قرار داده شد و با استفاده از متر لیزری که بر روی لوله‌های ریلی و چارچوب فلزی متحرک نصب شده بود، توپوگرافی سطح رسوبات در ابتدا و انتهای هر آزمایش برداشت می‌گردید. در این مطالعه دو سری آزمایش شامل آزمایش‌های شاهد و آزمایش‌های اصلی بدون و با وجود نشست رو به بالا انجام گرفت. از سه اندازه‌ی مختلف مصالح رسوبی یکنواخت ( $\sigma_g \leq 1.3$ ) با اندازه متوسط  $0.16$ ،  $0.23$  و  $0.31$  میلی‌متر و چگالی ویژه به ترتیب  $2.57$ ،  $2.52$  و  $2.56$  استفاده شده است و هر رسوب با سه مقدار دبی مختلف  $0.10$ ،  $0.20$  و یا  $0.15$ ،  $0.20$  و  $0.25$  لیتر بر ثانیه آزمایش گردید. هریک از این آزمایش‌های شاهد با سه عمق مختلف پایاب  $0.16$ ،  $0.21$  و  $0.26$  سانتی‌متر انجام گرفت. به منظور تامین نشست رو به بالا، تجهیزاتی در زیر فلوم در محدوده آزمایش‌ها نصب گردید که از یک طرف متصل به مخزن آب با بار آبی ثابت و از طرف دیگر به محفظه تامین نشست روبه بالا در زیر فلوم متصل شده بود. مقدار دبی نشست توسط شیر قبل از فلوم در مسیر لوله اتصال کنترل می‌گردید و بار آبی مورد نیاز برای تامین دبی نشست نیز با تغییر تراز سطح آب در مخزن ایجاد می‌گردید. میزان بار آبی موثر اعمال شده توسط لوله پیژومتری که در نزدیکترین فاصله به فلوم و متصل به لوله تامین دبی نشست رو به بالا بود، اندازه‌گیری می‌گردید.



شکل ۱- شماتیکی از پروفیل مخروط رسوب شویی تحت فشار.

می‌گیرد. سرکار و دی (۲۰۰۷) تاثیر نشست رو به بالا را بر عمق آبشستگی پائین دست جت‌های افقی (با حضور کف بند افقی) مطالعه و نتیجه گرفتند که افزایش میزان نشست رو به بالا باعث افزایش ابعاد چاله فرسایشی می‌گردد. در مطالعه دیگری دی و سرکار (۲۰۰۷) تاثیر نشست رو به بالا را بر عمق آبشستگی پائین دست جت افقی که بلافاصله پائین دست دریچه اتفاق می‌افتد (بدون وجود کف بند افقی) بررسی کردند. در این مطالعه نتایج آنها نشان می‌دهد که ابعاد چاله آبشستگی کاهش می‌یابد. دلیل عمده تفاوت نتایج مطالعات فوق را در تفاوت الگوی جریان ذکر کرده‌اند. از آنجا که تا کنون مطالعه‌ای در رابطه با تاثیر نشست روبه بالا بر میزان ابعاد چاله فرسایشی در پائین دست جت‌های قائم و بطور خاص پائین دست سازه کنترل شیب انجام نشده است و به دلیل تفاوت الگوی جریان در پائین دست جت‌های عمودی با جت‌های افقی، مطالعه حاضر انجام شده است.

#### مواد و روش‌ها

برای رسیدن به اهداف این تحقیق و انجام آزمایش‌ها، مدل فیزیکی با ابعاد بزرگ در موسسه تحقیقات آب و وزارت نیرو طراحی و ساخته شد. فلوم آزمایشگاهی جمعاً به طول ۱۲ متر و عرض ۸۰ سانتی‌متر با دیواره از جنس پلکسی گلاس استفاده شد. سازه کنترل شیب شامل سرریز لبه پهن با ارتفاع  $62/1$  سانتی‌متر بود که در پایین دست آن ذرات رسوبی با دانه‌بندی مختلفی قرار می‌گرفتند. در انتهای فلوم سرریز مستطیلی لبه تیز جهت اندازه‌گیری دبی نصب گردید.

تفکیک‌پذیری  $0.1 \text{ cm/s}$  می‌باشد. برداشت داده‌های سرعت توسط این دستگاه بین ۱۵ تا ۶۰ هرتز می‌باشد. سنسور دستگاه در انتها شامل یک توپی بوده و سرعت‌های سه بعدی را بصورت نقطه‌ای اندازه‌گیری می‌کند. این سرعت سنج بصورت الکترومغناطیسی عمل کرده و با ایجاد یک میدان الکترومغناطیسی در اطراف قسمت توپی شکل، سرعت ذرات آب را از طریق رابط به دستگاه ثبت و سرانجام به کامپیوتر منتقل می‌کند. داده‌های خروجی به فرمت Raw ذخیره شده که از طریق نرم افزار WinLabEM (نرم افزار ارائه شده توسط دستگاه) می‌توان داده‌های ثبت شده را به فرمت Csv تبدیل کرده که این فرمت با نرم افزار Excel قابل خواندن است.

روش انجام آزمایش هم بدین گونه بود که ابتدا اجازه داده شد چاله فرسایشی به مدت زمان شش ساعت شکل بگیرد سپس فرم چاله فرسایشی طوری تثبیت می‌شدند که نفوذپذیری مصالح رسوبی تغییر نکند و ضمناً ذرات رسوبی درحین اندازه‌گیری مولفه‌های سرعت که معمولاً تا هشت ساعت طول می‌کشید جابجا نشوند و الگوی چاله‌ی فرسایشی تغییر نکند و ذرات به سنسور دستگاه آسیب نرسانند. اندازه‌گیری هم برای شرایط بدون اعمال نشت و هم با اعمال سه میزان بارآبی مختلف برابر ۵۶، ۶۳ و ۷۳ سانتی‌متر انجام گرفت (برای اطلاع بیشتر از نحوه چگونگی انجام آزمایش‌ها به منبع شفافی بجزستان و نبوی رضوی (۱۳۹۱) مراجعه شود.

قبل از شروع آزمایش‌ها، رابطه‌ای بین بارآبی اعمال شده و دبی نشت با انجام آزمایش‌های مقدماتی بدست آمد. از این رابطه برای محاسبه دبی نشت رو به بالا با داشتن بارآبی، که براحتی قابل اندازه‌گیری بود، استفاده می‌شد.

تعیین میزان بارآبی نشت رو به بالا از حساس‌ترین برنامه‌ی این تحقیق بود زیرا در صورتی‌که میزان بار آبی بسیار ناچیز باشد تاثیر بسیار ناچیزی در نتایج حاصل می‌شود، اختلاف عمق آبستگی در حد یک میلی‌متر که با توجه به اندازه رسوبات این تحقیق این مقدار در دامنه عدم قطعیت داده‌ها قرار می‌گرفت، لذا قابل استناد نمی‌باشد. از طرفی افزایش بیش از حد میزان بارآبی نشت رو به بالا باعث می‌شد تا ذرات در اثر افزایش گرادیان خروجی غوطه‌ور شوند و با کم‌ترین دبی سرریز جابجا شوند. علاوه بر این برای مقایسه نتایج ضروری بود که بارآبی برای تامین نشت رو به بالا برای همه اندازه مصالح رسوبی نیز تقریباً به هم نزدیک باشند و ضمناً مقادیر بارآبی برای تامین نشت رو به بالا طوری انتخاب شدند که نسبت دبی نشت رو به بالا به دبی سرریز در محدوده کمتر یا مساوی یک باشند. دلیل انتخاب نسبت دبی نزدیک به یک نیز با در نظر گرفتن طبیعت سازه آبشکن در رودخانه‌های کوهستانی بود زیرا این سازه‌ها در زمان‌های کم آبی و یا خشک رودخانه می‌توانند تحت تاثیر میزان دبی نشت رو به بالای برابر دبی سرریز هم قرارگیرند.

در این مطالعه در تعدادی از آزمایش‌ها با دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه و عمق پایاب ۲۱ سانتی‌متر مولفه‌های سه بعدی سرعت نیز برداشت گردید. برای اندازه‌گیری سه بعدی سرعت از دستگاه سرعت سنج الکترومغناطیسی JFE ALEC مدل ACM3-RS استفاده گردید (شکل ۲). این سرعت سنج قادر به اندازه‌گیری سرعت در سه جهت  $X, Y$  و  $Z$  بوده و حداکثر سرعت قابل اندازه‌گیری در هر کدام از راستاها  $\pm 250 \text{ cm/s}$  می‌باشد. دقت اندازه‌گیری توسط دستگاه  $\pm 2\%$  و یا  $0.5 \text{ cm/s}$  با

تکراری و نیز صرفنظر کردن از پارامترهایی که تاثیر ناچیزی دارند نظیر عدد رینولدز و یا ثابت بودن این پارامترها، رابطه کلی زیر بدست می آید:

$$\frac{d_s}{H} = \phi \left( \frac{H}{y_t}, \frac{H_s}{H}, \frac{Q^2}{gH^5}, \frac{H}{d_{50}}, \frac{\rho_s}{\rho} \right) \quad [۲]$$

در این رابطه  $\rho_s/\rho$  چگالی ویژه رسوب است که با  $G_s$  نشان داده می شود. در صورت ترکیب پارامترهای بدون بعد  $H/y_t$ ،  $H/d_{50}$  و  $G_s-1$  پارامتر بدون بعد  $y_t/(G_s-1)d_{50}$  خواهد آمد.

### نتایج و بحث

#### بررسی تغییرات پارامترهای موثر در آب شستگی

در این تحقیق تاثیر عواملی چون بارآبی و یا دبی نشت روبه بالا تحت تاثیر سه مقدار دبی سرریز (۱۰، ۱۵ و ۲۰ لیتر بر ثانیه) و سه عمق مختلف پایاب (۱۶، ۲۱ و ۲۶ سانتی متر) و سه اندازه مختلف رسوب مورد بررسی قرار می گیرد.

#### تاثیر دبی سرریز

به منظور بررسی تاثیر همزمان دو پارامتر نشت رو به بالا و نیز دبی سرریز شکل های شماره ۳ الی ۷ رسم گردیده است. این شکل ها تغییرات پارامترهای مذکور را برای یک عمق پایاب ثابت نشان می دهد و همان گونه که انتظار می رفت به طور کلی برای یک عمق پایاب ثابت به ازاء افزایش دبی سرریز برای یک بارآبی نشت رو به بالا، مقدار عمق آبشستگی افزایش می یابد. این نکته برای کلیه مصالح رسوبی صادق است. دلیل عمده آن افزایش انرژی جنبشی جت آب و یا قدرت گرداب می باشد که منجر به عمق آبشستگی بیشتری می گردد. به منظور بررسی کمی جدول ۱ با استفاده از شکل های ۳ الی ۵ تهیه شده است.

جدول ۱- میزان درصد کاهش عمق آبشستگی به ازای

افزایش تقریبی ۳۰٪ بارآبی نشت رو به بالا.

$Q(L/s)$	۱۰	۱۵	۲۰
$y_t=16$	۲۰	۵۰	-
$y_t=21$	۱۹	۲۵	۴۰
$y_t=26$	۲۰	۲۰	۲۵



شکل ۲- اندازه گیری مولفه های سرعت با دستگاه سرعت سنج الکترومغناطیس JFE ALEC مدل ACM3-RS.

#### آنالیز ابعادی

به منظور برنامه ریزی آزمایش ها و نیز تحلیل نتایج ضروری است که روابط کلی و پارامترهای بدون بعد موثر استخراج گردند که این امر با کمک آنالیز ابعادی و استفاده از نظریه ی باکینگهام به شرح زیر میسر گردید:

$$F(d_s, z, y_t, Q, g, d_{50}, H, H_s, \rho, \rho_s, \mu, Q_s) = 0 \quad [۱]$$

در این رابطه  $d_s$  = عمق آب شستگی،  $z$  = ارتفاع سازه کنترل شیب نسبت به بستر که در این مطالعه ثابت بوده است،  $y_t$  = عمق آب پایاب،  $Q$  = مقدار دبی عبوری از بالای سازه کنترل شیب،  $\rho_s$  = جرم مخصوص ذرات بستر،  $\rho$  = جرم مخصوص آب،  $g$  : شتاب جاذبه،  $d_{50}$  : قطری که ۵۰ درصد ذرات از آن کوچکتر هستند،  $H$  : اختلاف سطح آب بالا و پایین دست سازه،  $Q_s$  و  $H_s$  : به ترتیب دبی و بار آبی نشت رو به بالا هستند که همان گونه که قبلا اشاره شد با هم مرتبط هستند لذا در ادامه صرفا از بار آبی در تحلیل نتایج استفاده خواهد شد. که از طریق محفظه تحتانی فلوم به ذرات بستر اعمال می شود. با انتخاب  $\rho$ ،  $Q$  و  $\mu$  بعنوان سه متغیر

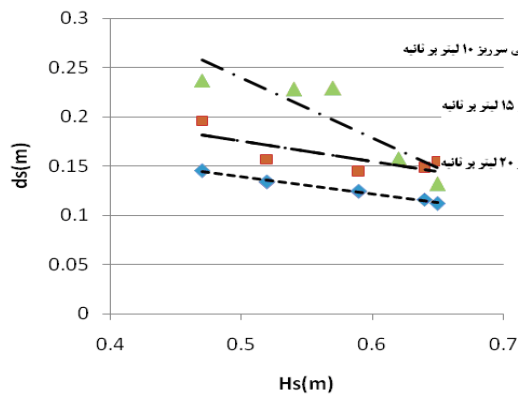
## تاثیر بارآبی نشت روبه بالا

از شکل‌های ۳ الی ۷ می‌توان میزان تاثیر بار آبی ناشی از نشت رو به بالا را بر عمق آبستگي استخراج کرد. همان‌گونه که از این شکل‌ها ملاحظه می‌شود به ازاء دبی ثابت سرریز و عمق پایاب ثابت با افزایش بارآبی نشت رو به بالا، عمق آبستگي کاهش بیشتری می‌یابد. همچنین به صورت کلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که درحفره آبستگي درصورتی که عمق آب پایاب ثابت درنظر گرفته شود، در شرایط مساوی به ازاء مقادیر مختلف بارآبی نشت روبه بالا، با افزایش مقدار دبی سرریز شونده مقدار عمق آبستگي با شدت بیشتری کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر شیب خطوط دبی‌های بیشتر، تندتر می‌باشد. بطور کلی روند تغییرات عمق آبستگي در مقابل مقدار نشت رو به بالا کاهش است هر چند که شیب تغییرات بستگی به دبی، عمق پایاب و اندازه رسوب دارد. بطور مثال شکل ۳ که مربوط به نمونه اول یا کوچکترین اندازه رسوبی و کمترین عمق پایاب است را درنظر بگیرید. میزان عمق آبستگي با افزایش بارآبی نشت رو به بالا در دبی ده لیتر برثانیه از ۰/۱۵ متر به حدود ۰/۱ متر کاهش یافته است. در حالی‌که این میزان کاهش در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه از ۰/۲۵ متر به حدود ۰/۱ متر کاهش داشته است. به عبارتی می‌توان گفت که تاثیر نشت رو به بالا در دبی‌های سرریز پائین بیشتر از دبی‌های سرریز بیشتر است. از آنجا که ایجاد حفره آبستگي پائین‌دست شیب شکن و جت‌های قائم به دلیل انرژی جنبشی ناشی از جت قائم است، در یک عمق پایاب ثابت افزایش دبی سرریز باعث افزایش انرژی جنبشی جت در نزدیک بستر می‌گردد. یا به عبارتی انرژی جت کمتر مستهلک می‌شود و انتظار هم این است که با افزایش دبی (در عمق پایاب و مصالح ثابت) عمق آبستگي افزایش یابد. در شرایطی که نشت رو به بالا وجود داشته باشد مولفه سرعت نشت رو به بالا می‌تواند با مولفه سرعت رو به پائین جت مقابله کند و از قدرت تخریبی جت بکاهد. مسلماً این مقابله در دبی‌های کم، که انرژی جت کمتر است، بیشتر موثر است و در دبی‌های زیاد تاثیر آن کاهش می‌یابد.

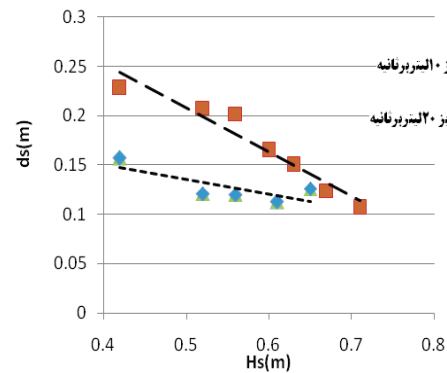
تاثیر دبی سرریز با افزایش عمق پایاب البته کاهش می‌یابد بطور مثال از جدول ۱ مشخص است که در دبی‌های ۱۵ و ۲۰ لیتر برثانیه، افزایش عمق پایاب باعث شده است تا درصد کاهش عمق پایاب کمتر شود. دلیل آن هم واضح است چون در عمق پایاب کم، انرژی جنبشی جت در بستر بیشتر است و لذا مولفه سرعت قائم رو به بالای نشت می‌تواند درصد بیشتری از این انرژی را خنثی کند. در دبی‌های خیلی کم نظیر دبی ده لیتر بر ثانیه تاثیر عمق پایاب بسیار کم است چرا که در چنین شرایطی انرژی جنبشی ناشی از جت در نزدیکی بستر کم است و میزان عمق آبستگي نیز ناشی از آن هم کم است بنابراین تاثیر افزایش بار آبی نشت رو به بالا تاثیر چندانی بر عمق آبستگي ندارد.

## تاثیر عمق پایاب

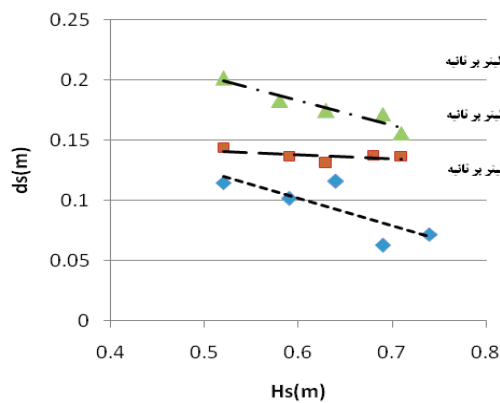
از مقایسه شکل‌های ۳، ۴ و ۵ و نیز جدول ۱ می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افزایش عمق پایاب از ۱۶ به ۲۶ سانتی‌متر مقدار عمق آبستگي کاهش بیشتری خواهد داشت. بدیهی است در عمق پایاب بیشتر، جت قائم باید فاصله بیشتری را تا رسیدن به رسوبات بستر در میدان جریان آشفته طی نماید. در اثر تنش‌های موجود در جریان‌های آشفته، انرژی بیشتری از جت قائم مستهلک خواهد شد و در نتیجه تنش برشی کمتری به ذرات بستر اعمال خواهد شد و در نتیجه این فرآیند عمق آبستگي کاهش چشمگیری می‌یابد. همچنین با ملاحظه اشکال مورد اشاره می‌توان دریافت که در صورتی که عمق پایاب کمتر شود، کاهش عمق آبستگي در اثر اعمال دبی نشت روبه بالا یا مقدار فشار نشت روبه بالا با شیب تندتری صورت می‌گیرد، از این فرآیند می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مقدار بیشتری از تنش برشی که به وسیله جت قائم ورودی اعمال می‌شود، توسط بردار سرعت که در جهت مخالف توسط سرعت نشت رو به بالا اعمال می‌شود کاسته می‌شود و در نتیجه از عمق حفره آبستگي با افزایش فشار نشت روبه بالا کاسته می‌شود و به عبارت دیگر، بارآبی نشت روبه بالا در شرایطی که عمق پایاب کمتر می‌باشد، اثر بارز و مشخص‌تری بر روی کاهش عمق آبستگي می‌گذارد.



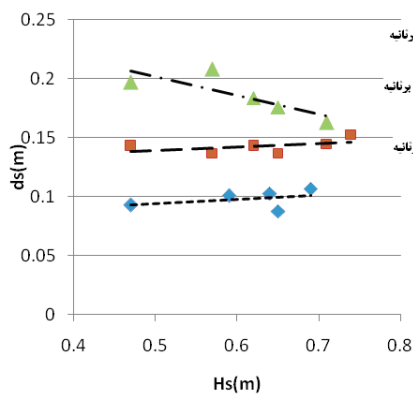
شکل ۳- حداکثر عمق آبشستگی در مقابل بارآبی نشت رو به بالا در دبی‌های مختلف سرریز (عمق پایاب ۲۱ سانتی‌متر و رسوب ۱/۶ میلی‌متر).



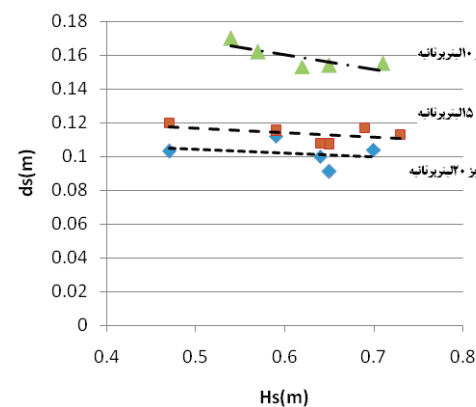
شکل ۴- حداکثر عمق آبشستگی در مقابل بارآبی نشت رو به بالا در دبی‌های مختلف سرریز (عمق پایاب ۱۶ سانتی‌متر و رسوب ۱/۶ میلی‌متر).



شکل ۵- حداکثر عمق آبشستگی در مقابل بارآبی نشت رو به بالا در دبی‌های مختلف سرریز (عمق پایاب ۲۶ سانتی‌متر و رسوب ۱/۶ میلی‌متر).



شکل ۶- حداکثر عمق آبشستگی در مقابل بارآبی نشت رو به بالا در دبی‌های مختلف سرریز (عمق پایاب ۲۱ سانتی‌متر و رسوب ۳/۱ میلی‌متر).



شکل ۷- حداکثر عمق آبشستگی در مقابل بارآبی نشت رو به بالا در دبی‌های مختلف سرریز (عمق پایاب ۲۱ سانتی‌متر و رسوب ۲/۳ میلی‌متر).



## تاثیر اندازه مصالح بستر

با مقایسه شکل‌های ۴، ۶ و ۷ می‌توان تاثیر اندازه مصالح بستر را بررسی کرد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با بزرگتر شدن اندازه ذرات رسوبي و یا سنگین شدن این ذرات، در حالی‌که سایر شرایط ثابت باشد، شیب تغییرات عمق آبستگي در مقابل بارآبی نشت رو به بالا کمتر می‌شود و این به دلیل افزایش وزن ذره است که در ذرات بزرگتر تاثیر نشت رو به بالا کاهش می‌یابد و عملاً مؤلفه سرعت رو به بالا در اثر نشت، قدرت مقابله با وزن ذره را ندارد. همان‌گونه که از شکل ۷ نیز مشخص است

## استخراج رابطه

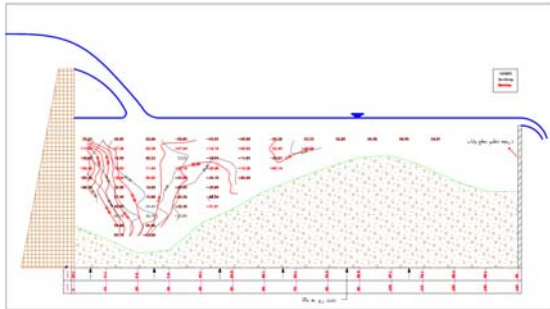
در این بخش براساس اطلاعات آزمایشگاهی و با استفاده از نرم افزار Minitab رابطه جدیدی برای پیش‌بینی عمق آبستگي در پایین‌دست سازه کنترل شیب، با لحاظ نشت رو به بالا توسعه و ارائه می‌شود. این رابطه به استناد رابطه کلی است که در بخش آنالیز ابعادی ارائه شد:

$$\left[3\right] \frac{d_s}{H} = 0.977 \left(\frac{H_s}{H}\right)^{-0.846} \left(\frac{Q^2}{gH^5}\right)^{0.353} \left(\frac{H}{y_t}\right)^{0.322} \left(\frac{y_t}{d_{50}(G_s - 1)}\right)^{0.365}$$

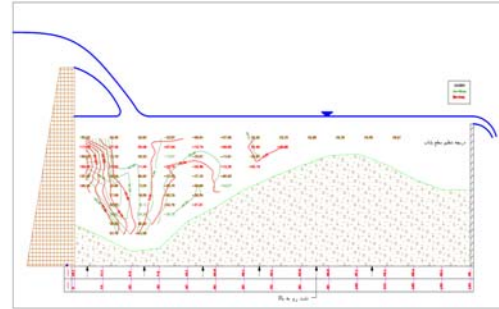
این رابطه نیز نشان می‌دهد که عمق آبستگي با مقدار نشت رو به بالا رابطه عکس دارد. هرچند تحقیقات مشابهی تا کنون منتشر نشده‌است ولی نتایج تحقیقات سرکار و دی (۲۰۰۷) و دی و سرکار (۲۰۰۷) در رابطه با آبستگي پائین‌دست دریاچه‌های کشویی (جت افقی) با و بدون کف‌بند نشان داد که عمق آبستگي در شرایط با کف بند با افزایش نشت رو به بالا افزایش ولی در شرایط بدون کف بند افقی کاهش می‌یابد. دلیل اصلی تفاوت در نتایج را تفاوت در الگوی جریان ذکر کرده‌اند. هرچند مطالعات آنها در یک فلوام کوچک و بارآبی نشت رو به بالای اعمال شده بسیار کم بوده است بطوری‌که تغییرات عمق آبستگي گزارش شده در حد یک تا دو میلی‌متر بوده است ولی روند کاهشی و افزایشی اشاره شده مورد تایید بوده‌است. مسلماً بارآبی نشت رو به بال نیروی درجهت رو به بالا به ذره رسوبي وارد می‌کند که باعث ناپایداری ذرات

رسوبي می‌گردد ضمن اینکه چنگ و چپو (۱۹۹۹) نیز نشان دادند که سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبي در یک کانال باز با وجود نشت رو به بالا کاهش می‌یابد. بنابراین انتظار این است که همیشه نشت رو به بالا باعث افزایش عمق آبستگي گردد. در حالی‌که هم در مطالعات دی و سرکار (۲۰۰۷) و هم در مطالعات حاضر نشان داده شد که افزایش بارآبی نشت رو به بالا باعث کاهش عمق آبستگي می‌شود. برای اطمینان بیشتر از صحت داده‌های آزمایشگاهی در مطالعه‌ی حاضر علاوه بر تکرار تعدادی از آزمایش‌ها مقادیر بالائی از بارآبی نیز اعمال گردید تا تغییرات عمق آبستگي در محدوده عدم قطعیت سنجش عمق آبستگي نباشد. از این رو باید دلیل آن‌را در تاثیر عامل دیگری به غیر از کاهش وزن در اثر نشت رو به بالا جستجو کرد. مسلماً کاهش قدرت گردابه برخاستگی ناشی از جت عمودی می‌تواند عامل این تغییرات باشد که خود به میزان کاهش مؤلفه‌ی قائم سرعت رو به پائین جت عمودی بستگی دارد.

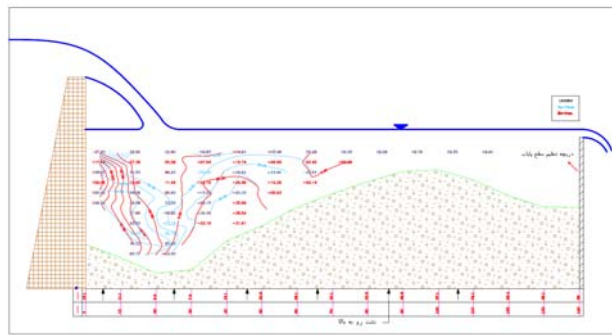
برای بررسی تغییرات الگوی جریان تحت تاثیر نشت رو به بالا در حفره آبستگي، اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه بعدی سرعت در تعدادی از آزمایش‌ها در شرایط بدون و با وجود نشت رو به بالا همان‌گونه که قبلاً توضیح داده شد انجام گرفت. از آنجا که مؤلفه رو به پائین قائم سرعت نقش بسیاری در ایجاد نیروی برکنده به ذرات رسوبي بستر دارد، توزیع این مؤلفه سرعت در محدوده چاله فرسایشی مورد تحلیل قرار گرفت. شکل‌های ۷، ۸ و ۹ این نتایج را نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد با اعمال بار آبی نشت رو به بالا، مقادیر مؤلفه عمودی سرعت به نحو کاملاً محسوسی کاهش یافته است به عنوان نمونه مؤلفه عمودی سرعت جریان در نزدیکترین محل به سطح ذرات رسوبي برای آزمایش بدون و با بار آبی ۶۳ سانتی‌متر در جدول ۲ مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۹- مقایسه الگوی توزیع سرعت در جریان آشفته در شرایط بدون اعمال نشست رو به بالا و اعمال بار فشار موثر معادل ۶۳ سانتی‌متر



شکل ۸- مقایسه الگوی توزیع سرعت در جریان آشفته در شرایط بدون اعمال نشست رو به بالا و اعمال بار فشار موثر معادل ۵۶ سانتی‌متر



شکل ۱۰- مقایسه الگوی توزیع سرعت در جریان آشفته در شرایط بدون اعمال نشست رو به بالا و اعمال بار فشار موثر معادل ۷۳ سانتی‌متر.

جدول ۲ - مقایسه تغییرات مولفه قائم سرعت (cm/s) در لایه‌های نزدیک به سطح بستر در جهت جریان با اعمال بار آبی نشست رو به بالا برابر صفر و ۶۳ سانتی‌متر.

درصد تغییرات نسبت به حالت بدون نشست	با حضور نشست رو به بالا (بار آبی ۶۳ سانتی‌متر)	بدون نشست رو به بالا	موقعیت برداشت نسبت به سرریز
-۴۷/۸	۶۶/۳۲	۱۲۷	۱
-۱۵/۴۱	۸۸/۰۹	۱۰۴/۱	۲
-۲۰/۸۹	۶۱/۸۸	۷۸/۲۲	۳
-۱۰/۳۱	۶۰/۷۸	۶۷/۷۷	۴
-۳/۹۳	۵/۸۲	۵/۶	۵
-۲/۴۱	-۳۲/۳۹	-۳۳/۱۹	۶
+۵/۰۶	-۳۷/۸۱	-۳۵/۹۹	۷
+۹/۶۰	-۴۲/۲۴	-۳۸/۵۴	۸

دریافت که با اعمال نشست رو به بالا مقادیر مولفه قائم

براساس اطلاعات مندرج در جدول ۲ می‌توان

میزان نشت رو به بالا کاهش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه تاثیر میزان نشت رو به بالا بر میزان عمق آبستگی در پائین‌دست سازه‌های کنترل شیب و یا آبشارهای قائم که جریان به صورت ریزشی و آزاد است بررسی شد. آزمایش‌های متعددی با و بدون وجود نشت رو به بالا تحت سه نوع اندازه ذرات رسوبی مختلف، سه عمق پایاب مختلف، سه دبی سرریز مختلف و پنج بارآبی مختلف نشت انجام گرفت. نتایج نشان داد که تاثیر نشت رو به بالا باعث کاهش عمق آبستگی می‌گردد. این میزان کاهش در یک دبی سرریز به عمق پایاب و اندازه مصالح رسوبی بستگی دارد. به طوری که با کاهش عمق پایاب و کوچکتر شدن ذرات رسوبی، تاثیر آن بیشتر است. هرچند مشابه این تحقیق تا کنون منتشر نشده است ولی نتایج این تحقیق با مطالعات در خصوص جت‌های افقی یعنی مطالعه دی و سرکار (۲۰۰۷) و سرکار ودی (۲۰۰۷) مقایسه شد و مشخص گردید که با نتایج مطالعه اولی همخوانی دارد ولی با نتایج مطالعه دومی همخوانی ندارد. دلیل عمده را می‌توان در تفاوت نوع الگوی جریان دانست. بطوری که الگوی جریان در مطالعه حاضر مشابه مطالعه دی و سرکار (۲۰۰۷) می‌باشد ولی با الگوی جریان در مطالعه سرکار و دی (۲۰۰۷) کاملاً متفاوت است. دلیل عمده کاهش عمق آبستگی در اثر افزایش بار آبی نشت رو به بالا که در این مطالعه مشاهده شد، کاهش مولفه‌ی رو به پائین سرعت عمودی جت آب تشخیص داده شد. به طوری که در موقعیت حداکثر عمق آبستگی و در یکی از آزمایش‌ها این میزان کاهش به ۴۷ درصد رسید. با دور شدن از منطقه حداکثر چاله فرسایشی، مولفه عمودی سرعت جت با مولفه سرعت نشت همسو شده و افزایش می‌یابد و لذا در صورتی که چاله آبستگی در فاصله دورتری اتفاق افتد، نشت رو به بالا می‌تواند باعث افزایش عمق آبستگی گردد همانگونه که در مطالعه سرکار و دی (۲۰۰۷) افتاده است.

سرعت در نزدیکی بستر و در موقعیت حداکثر عمق فرسایشی تا ۴۷٪ کاهش یافته است. این به دلیل غیر هم جهت بودن مولفه قائم سرعت نشت و سرعت جت است که باعث می‌گردد تا از سرعت عمودی جت در نزدیکی بستر کاسته شود. در نقاط دور دست‌تر از حداکثر عمق چاله و نقاطی که جهت مولفه عمودی سرعت رو به بالا است ملاحظه می‌شود که مقادیر مولفه قائم سرعت افزایش یافته است. این مسئله به دلیل هم جهت بودن مولفه‌های سرعت ناشی از نشت رو به بالا و مولفه عمودی سرعت جریان است چرا که جت آب پس از برخورد با بستر تغییر جهت می‌دهد و با جهت سرعت نشت رو به بالا همسو می‌گردد و در نتیجه مقادیر مطلق سرعت در جهت رو به بالا افزایش یافته است.

با توجه به مطالب مذکور می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در پائین‌ترین نقاط جریان آشفته (نزدیک به سطح رسوبات) با اعمال نشت رو به بالا و با کاهش مقادیر مؤلفه سرعت عمودی رو به پایین ضمن استهلاک بیشتر انرژی جنبشی آب، کاهش فرسایش و جابجایی ذرات و به تبع آن کاهش عمق آبستگی حادث گردیده است و در فواصل دورتر از چاله آبستگی، با هم افزایی بردارهای سرعت ناشی از نشت رو به بالا و جت، ذرات با قدرت بیشتری جابجا می‌گردند. این مسئله باعث می‌شود که فاصله حفره آبستگی از محل سرریز در حالت وجود نشت رو به بالا طولانی‌تر از حالت بدون وجود نشت رو به بالا باشد (شفاعی بجستان و نبوی رضوی ۱۳۹۱).

سرکار و دی (۲۰۰۷) نیز در شرایط با وجود کف‌بند ملاحظه کردند که عمق آبستگی افزایش می‌یابد و دلیل آن را می‌توان هم‌افزایی مولفه عمودی سرعت در مناطق دورتر از منطقه برخورد جت دانست که باعث افزایش نیروهای هیدرودینامیک وارده بر ذرات رسوبی می‌گردد. در حالیکه در مطالعات دی و سرکار (۲۰۰۷) بدون کف بند افقی و مطالعه حاضر، انرژی مولفه‌های رو به پائین سرعت توسط مولفه رو به بالای سرعت ناشی از نشت کاسته می‌گردد و در نتیجه عمق آبستگی در پائین‌دست جت‌های عمودی در اثر افزایش

## سپاسگزاری

انجام شده است که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

این مطالعه با حمایت مالی سازمان آب و برق استان خوزستان در موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو

## منابع مورد استفاده

- رضوی نبوی س م، شفاعی بجهستان م و کاشفی پور س م، ۱۳۹۱. برآورد عمق آبشستگی پائین دست سازه‌های کنترل شیب. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۱۳، شماره ۳، صفحه‌های ۱ تا ۱۴.
- شفاعی بجهستان م و رضوی نبوی س م ۱۳۹۱. تاثیر نشت رو به بالا بر میزان آبشستگی بستر پایین دست سازه‌های کنترل شیب، گزارش نهائی طرح تحقیقاتی ارائه شده به سازمان آب و برق خوزستان، ۱۶۰ صفحه.
- مهرآیین م، قدسیان م و رنجبر ح، ۱۳۸۹. بررسی آزمایشگاهی اثر غیر یکنواختی مصالح بر ابعاد حفره آبشستگی پایین دست جت‌های ریزشی آزاد. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری - دانشکده فنی، دوره ۴۴، شماره ۱۱، صفحه‌های ۲۵۳ تا ۲۶۴.
- مؤمنی و صالحیان ر، موسوی جهرمی ح و شفاعی بجهستان م، ۱۳۸۷. آبشستگی ناشی از جت‌های مستطیلی در پائین دست پرتابه‌های جامی شکل با مصالح غیریکنواخت. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی جلد پانزدهم، شماره دوم، صفحه‌های ۲۰۳ تا ۲۱۷.
- Azmatullah H, Deo MC and Deolalikar PB 2005. Neural networks for estimation of scour downstream of a ski-jump bucket. *J Hydraul Eng* 131(10): 898-908.
- Bormann NE and Julien PY 1991. Scour downstream of grade-control structures. *J Hydraul Eng ASCE* 117(5): 579-594.
- Cheng NS and Chiew YM 1998a. Turbulent open-channel flow with upward seepage. *J Hydraul Res* 36(3): 415-431.
- Cheng NS and Chiew YM 1998b. Modified logarithmic law for velocity distribution subjected to upward seepage. *J Hydraul Eng* 124(12): 1235-1241.
- Cheng NS and Chiew YM 1999. Incipient sediment motion with upward seepage. *J Hydraul Res* 37(5): 665-681.
- D' Agostino V and Ferro V 2004. Scour on alluvial bed downstream of grade control structures. *J Hydraul Eng ASCE* 130(1): 24-37.
- Dey S and Cheng NS 2005. Reynolds stress in open-channel flow with upward seepage. *J Eng Mech* 131(4): 451-457.
- Dey S, Sarker HK and Debnath K 1999. Sediment threshold under stream flow on horizontal and sloping beds. *J Eng Mech* 125(5): 545-553.
- Dey S and Sarkar A 2007. Effect of upward seepage on scour and flow downstream of an apron due to submerged jets. *J Hydraul Eng ASCE* 133(1): 59-69.
- Dey S and Zanke UCE 2004. Sediment threshold with upward seepage. *J Eng Mech* 130(9): 1118-1123.
- Guyen A and Gunal M. 2008. Prediction of scour downstream of grade-control structures using neural networks. *J of Hydraul Eng ASCE* 134(11): 1656-1660
- Mason P and Arumugam K 1985. Free jet scour below dams and flip buckets. *J Hydraul Eng ASCE* 111(2): 220-223.
- Sarkar A. and Dey S 2007. Effect of seepage on scour due to submerged jets and resulting flow field. *J Hydraulic Research IAHR* 45(3): 357-364
- Shafai Bejestan M and Albertson ML (1991). Discussion on scour control downstream of grade-control structures. *J Hydraul Eng ASCE* 117(12): 1066-1068.
- Scurlock S, Thornton C and Abt SR 2011. Equilibrium scour downstream of three-dimensional grade-control structures. *J Hydraul Eng ASCE* 138(2): 167-176.