

بررسی آزمایشگاهی میدان جریان توسط جت‌های آفست دوگانه

مجتبی مهرآیین^{1*}، مسعود قدسیان²، مرجان فلکی ساریقان³

1- استادیار گروه عمران، دانشگاه خوارزمی تهران

2- استاد دانشکده عمران و محیط زیست و پژوهشکده آب، دانشگاه تربیت مدرس

3- دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس

* mehraein@khu.ac.ir

چکیده - در مقاله حاضر بررسی میدان جریان شکل گرفته توسط جت‌های دوگانه آفست و ارتباط آن با فرایند آبشستگی در مراحل ابتدایی تشکیل حفره آبشستگی بررسی شد. برای این منظور دو آزمایش با عدد فرود مصالح متفاوت در شرایط عمق پایاب زیاد بر روی بستر صلب انجام شد و نتایج مطالعات میدان جریان بر روی بستر صلب با آزمایشات آبشستگی مقایسه شد. مطابق نتایج این تحقیق پارامترهایی مناسب برای بی‌بعد سازی و رسیدن به پروفیل‌های خود متشابه در عمق جریان، میزان افت حداکثر سرعت در طول جریان، میزان توسعه عمقی جت و پارامترهای نوسانی سرعت از جمله: نوسانات مؤلفه‌های طولی و عمقی سرعت و تنش‌های رینولدز ارایه شدند که هماهنگی خوبی بین پروفیل‌های بی‌بعد ارایه شده در این تحقیق و نتایج ارایه شده توسط سایر محققان وجود داشت. بررسی تنش‌های رینولدز وارد بر بستر نشان داد که روند تغییرات تنش‌های برشی با استفاده از سه روش استفاده شده تقریباً یکسان بوده و تخمین تنش برشی وارد بر بستر با استفاده از نوسانات عمقی سرعت بیشترین مقدار تنش برشی وارد بر بستر را نشان می‌دهد. علاوه بر این اختلاف بین مقادیر تنش برشی محاسبه شده از سه روش مورد مطالعه، برای نواحی با تنش برشی بیشتر، بیشتر است. از میان پارامترهای متعددی که برای تعیین ارتباط بین میزان آبشستگی و پارامترهای آشفتگی نزدیک کف بررسی شد، تنش برشی وارد بر بستر، محاسبه شده از تنش رینولدز، بیشترین هماهنگی را با فرایند آبشستگی داشته و پارامترهایی همچون زوایای اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی و نیز احتمال ایجاد پدیده‌ها، پارامترهای مناسبی برای تعیین حاکمیت پدیده‌های چهارگانه و تأثیرات آنها بر فرایند انتقال رسوب نیستند.

کلیدواژگان: جت آفست، میدان جریان آشفته، مطالعه آزمایشگاهی، آبشستگی.

1- مقدمه

جت‌ها یکی از معمولترین جریان‌های موجود در طبیعت هستند که در اثر اندرکنش یک جریان با سرعت زیاد و ضخامت کم با محیط پیرامونی با سرعت کمتر و یا در حال سکون، توسعه می‌یابند. جت‌ها را بر مبنای محل قرارگیری آن نسبت به مرز جامد و سطح آب، به سه دسته جت‌های دیواره‌ای، جت‌های آفست و جت‌های سطحی تقسیم‌بندی

می‌کنند. جت‌های آفست که در این تحقیق بررسی می‌شوند، جت‌هایی هستند که در فاصله‌ای محدود نسبت به مرز جامد قرار داشته و بسته به اینکه فاصله قرارگیری دهانه جت آفست تا سطح آب و مرز جامد چقدر است و همچنین خصوصیات جریان جت، به سمت سطح آب یا مرز جامد منحرف می‌شوند (Nasr and Lai, 2000). تحقیقات متعددی در مورد میدان جریان تک جت آفست

Kishore and Dey (2016) به بررسی تأثیرات ارتفاع قرارگیری جت آفست و عمق پایاب بر میدان جریان جت‌های آفست پرداختند و نشان دادند که طول ناحیه برگشت جریان در زیر خروجی جت تابعی از ارتفاع قرارگیری جت و عمق پایاب است. با وجود اینکه تحقیقات متنوعی در مورد میدان جریان جت آفست منفرد انجام شده است، اما تحقیقات در مورد ترکیب جت آفست منفرد به همراه انواع دیگر جت‌ها محدود است. Wang and Tan (2007) میدان جریان یک جت منفرد آفست با یک جت دیواره‌ای را بررسی کردند. بررسی پدیده‌های چهارگانه آشفستگی و سری زمانی میدان جریان نشان دهنده ریزش گردابه‌های با عدد استروهال $0/25$ بود. این محققان با انتخاب مناسبی از سرعت مشخصه و ارتفاع مشخصه، پروفیل‌های بی بعد شده سرعت را استخراج کردند و نشان دادند که تفاوت زیادی بین میزان افت سرعت حداکثری در طول مسیر حرکت جریان بین جت‌های دیواره-ای و برخورد جت‌های آفست و دیواره‌ای وجود دارد. تحقیقات Dey and Eldho (2009) از معدود تحقیقات انجام شده در مورد آبشستگی و میدان جریان ایجاد شده توسط جت‌های آفست دوگانه است. این محققان با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی اثر فاصله جت‌های آفست را بر ابعاد چاله آبشستگی بررسی کرده و با استفاده از مدل‌سازی عددی جریان این نوع جت‌ها، ارتباط بین تنش‌های برشی وارد بر بستر و انرژی جنبشی آشفستگی با میزان آبشستگی را بررسی کردند. در شرایط عملی، جت‌های آفست چندگانه در خروجی سدها و نیروگاه‌ها مشاهده می‌شوند. از آنجا که تحقیقات Dey and Eldho (2009) تنها محدود به بررسی تنش برشی وارد بر کف در شرایط تشکیل حفره آبشستگی بود، هنوز اطلاعات در مورد برخورد جت‌های آفست به یکدیگر در مراحل ابتدایی است. لذا هدف از انجام این تحقیق بررسی میدان جریان میانگین جت‌های دوگانه آفست، انتخاب پارامتری مناسب برای بی‌بعد سازی پروفیل‌های سرعت جریان، نحوه استهلاک حداکثر سرعت جریان در طول مسیر حرکت، بررسی پارامترهای آشفستگی و ارتباط بین پدیده‌های چهارگانه آشفستگی با آبشستگی است.

انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط Bourque and Newman (1960), Levin and Manion (1962), Rajaratnam and Subramanya (1968), Sawyer (1960,1963) اشاره کرد. Bourque and Newman (1960) به بررسی تأثیرات عدد رینولدز جریان جت و فاصله جت آفست تا مرز جامد بر روی میزان تغییرات فشار و ناحیه جریان برگشتی تشکیل شده در زیر مسیر حرکت جت پرداختند. Pelfrey and Liburdy (1986) با استفاده از دستگاه LDA به بررسی میدان جریان ایجاد شده توسط جت‌های آفست پرداختند. Holland and Liburdy (1990) میزان انتقال حرارت ایجاد شده توسط جت‌های آفست را بررسی کردند. نحوه تحلیل میدان جریان این محققان همانند تحقیقات انجام شده توسط Pelfrey and Liburdy (1986) بود، اما برای مقادیر متفاوتی از عدد رینولدز و فاصله قرارگیری جت نسبت به مرز جامد انجام شد. تأثیر میزان زبری بستر بر میدان جریان جت آفست توسط Yoon et al. (1995) انجام شد. مطابق تحقیق انجام شده توسط ایشان محدوده جریان برگشتی تشکیل شده در زیر جت آفست بر روی دیواره زیر بزرگتر از دیواره صاف است. Nasr and Lai (2000) با بررسی میدان جریان ناشی از جت‌های آفست روی بستر شیبدار نشان دادند که با افزایش زاویه قرارگیری بستر پایین دست نسبت به افق، ابعاد ناحیه جریان برگشتی در پایین دست افزایش می‌یابد و با انتخاب سرعت خروجی جت به عنوان پارامتر بی‌بعد کننده نوسانات سرعت، پروفیل‌های بی‌بعد شده نوسانات سرعت بخوبی بر روی یکدیگر منطبق خواهند شد، حال آنکه انتخاب سرعت حداکثری جت در هر مقطع موجب پخش داده‌های نوسانات سرعت در شرایط آزمایشی مختلف شد. Bhuiyan et al. (2011) به بررسی تأثیرات زبری بستر بر میدان جریان ناشی از جت‌های آفست پرداختند. بر طبق نظر ایشان میزان تأثیرات زبری بستر بر میدان جریان ناشی از جت‌های آفست بیشتر از تأثیرات آن بر میدان جریان ناشی از جت‌های دیواره‌ای است. بر طبق نظر Agelin- Chaab and Tachie (2011) محل اتصال جت آفست به بستر جامد مستقل از عدد رینولدز می‌باشد، اما با افزایش ارتفاع قرارگیری جت نسبت به بستر جامد افزایش می‌یابد.

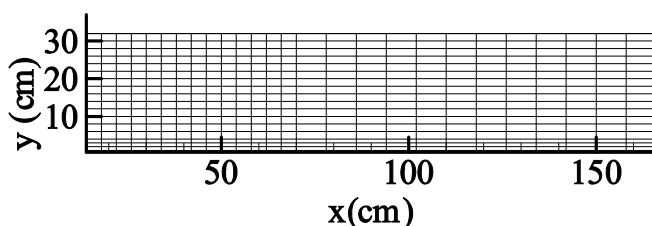
2- تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در یک کانال با طول مستقیم 7 m انجام شد. عرض کانال 0/58 m و ارتفاع آن 0/95 m بود. جنس دیواره‌های کانال از شیشه بود. برای تثبیت عمق جریان در پایاب از یک دریچه پروانه‌ای در انتهای کانال استفاده شد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از دبی سنج اولتراسونیک و برای اندازه‌گیری عمق پایاب از عمق سنج دیجیتالی با دقت 0/1 mm استفاده شد. بستر، با رسوباتی از جنس ماسه طبیعی رودخانه با دانه‌بندی تقریباً یکنواخت و انحراف معیار مصالح 1/3 پوشیده و تثبیت شد. قطر متوسط مصالح مورد استفاده در این تحقیق 1/28 mm بود. برای تثبیت بستر از دوغاب سیمان استفاده شد تا مصالح در اثر اندرکنش جت با بستر انتقال پیدا نکنند. آزمایش برای بررسی میدان جریان جت‌های دیواره‌ای دوگانه آفست برای دو دبی مختلف انجام شد که خلاصه‌ای

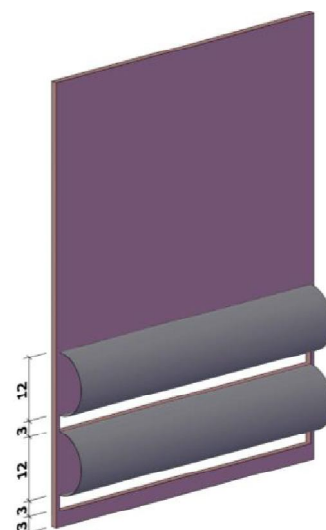
از شرایط انجام آزمایش‌ها در جدول 1 ارایه شده است. برای تولید جت‌های آفست دوگانه از صفحه‌ای از جنس رزین فشرده که شیارهایی با ضخامت 3 cm و هم عرض کانال در آن ایجاد شده بود، استفاده شد (شکل 1- الف). برای اندازه‌گیری سرعت جریان در هر نقطه از دستگاه ADV Vectrino استفاده شد. سرعت جریان در هر نقطه بمدت 3 تا 5 دقیقه برای رسیدن به شرایط تعادل نسبی پارامترهای آشفتگی ضبط شد. اندازه‌گیری سرعت در نقاط و مقاطع مختلف در محور طولی کانال (فاصله 29 cm از دیواره‌های جانبی) مطابق شبکه‌بندی در شکل 1- ب انجام شد. در این شکل x و y به ترتیب عبارتند از فاصله طولی از ابتدای جت و فاصله عمقی از بستر. به دلیل وجود گرادیان شدید جریان در نزدیک دهانه جت‌ها از شبکه‌بندی ریزتر در این ناحیه استفاده شد.

جدول 1 تغییرات پارامترهای آزمایشگاهی میدان جریان

| پارامتر | عمق پایاب Y_1 (cm) | میزان بازشدگی جت‌ها W (cm) | ارتفاع قرارگیری جت آفست اول تا بستر h_1 (cm) | ارتفاع قرارگیری جت آفست دوم تا بستر h_2 (cm) | قطر ذرات بستر d_{50} (mm) | دبی جریان Q (lit/s) |
|----------------|----------------------|------------------------------|--|--|-----------------------------|-----------------------|
| آزمایش شماره 1 | 37 | 3 | 3 | 18 | 1/28 | 18 |
| آزمایش شماره 2 | 37 | 3 | 3 | 18 | 1/28 | 28 |



ب- میدان جریان



الف- جت‌های آفست

شکل 1 جت‌های آفست و شبکه‌بندی میدان جریان

با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه (2) از رابطه (1) استخراج می‌شود.

$$\frac{\phi}{w} = f\left(\frac{Y_t}{w}, \frac{h_1}{w}, \frac{h_2}{w}, \frac{U_j}{\sqrt{gw}}, \text{Re} = \frac{U_j w}{\nu}, \frac{d_{50}}{w}, s, Fr_d = \frac{U_j t}{w}\right) \quad (2)$$

با ترکیب پارامترهای s ، $\frac{d_{50}}{w}$ و $\frac{U_j}{\sqrt{gw}}$ عدد فرود مصالح

$$Fr_d = \frac{U_j}{\sqrt{gd_{50}(s-1)}} \quad \text{بدست می‌آید که پارامتری}$$

شناخته شده در آبخستگی ناشی از جت‌ها است. با توجه به شرایط آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق (جدول

1)، مقادیر $\frac{Y_t}{w}$ ، $\frac{h_1}{w}$ ، $\frac{h_2}{w}$ ثابت بوده و از آنالیز ابعادی حذف

می‌شوند. با توجه به بزرگ بودن عدد رینولدز Re می‌توان از تأثیرات آن بر ابعاد چاله آبخستگی صرف‌نظر کرد (Rajaratnam and Mazurek 2003). بنابراین در تحقیق حاضر ابعاد چاله آبخستگی، تابعی از عدد فرود مصالح

(Fr_d) و پارامتر بی بعد شده زمان ($\frac{U_j t}{w}$) است. از آنجایی

که مقایسه‌ای بین نتایج میدان جریان بدست آمده در این تحقیق و سایر تحقیقات بر روی بسترهای زبر و بسترهای صاف با توجه به زبری نسبی ($\frac{d_{50}}{w}$) انجام شده است و یکی از پارامترهای شاخص در مقایسه بین رفتار جریان بر روی بسترهای زبر و بسترهای صاف، است، درمقایسه بین نتایج میدان جریان در این تحقیق و تحقیقات پیشین این پارامتر نیز در نظر گرفته شده است.

4- نتایج

4-1- شاخصه‌های سرعت میانگین جریان و

پروفیل‌های بی بعد سرعت

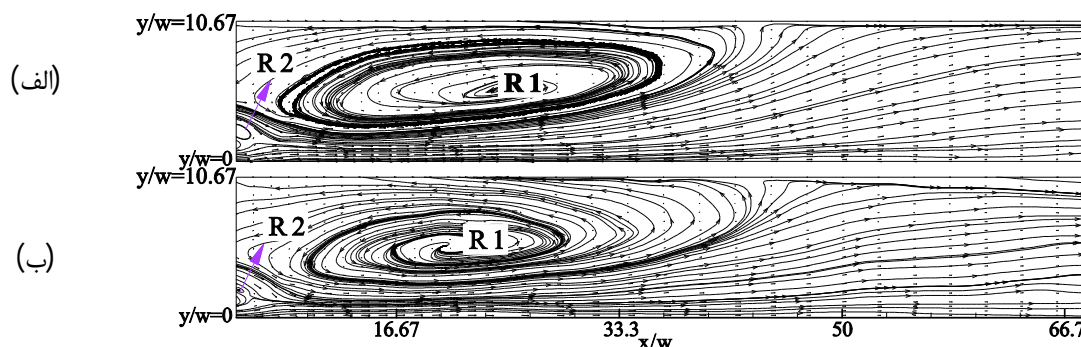
شکل‌های 2 نشان دهنده خطوط جریان در تحقیق حاضر برای دو عدد فرود مصالح است. وجود گردابه‌ای بزرگ در ترازهای فوقانی نزدیک به دیواره بالادست مشهود است (R1). اگر چه ابعاد گردابه بزرگ در هر دو آزمایش تقریباً با یکدیگر برابر است، اما مرکز گردابه تشکیل شده در $Fr_d = 5/4$ فاصله بیشتری تا دیواره بالادست، در مقایسه با $Fr_d = 3/47$ دارد.

(2008) Dey and Sarkar از فرکانس 50 Hz برای برداشت میدان جریان جت‌های دیواره‌ای استفاده کردند. اما در تحقیق حاضر فرکانس 100 Hz برای برداشت داده‌ها انتخاب شد چرا که با افزایش بیش از اندازه فرکانس برداشت داده‌ها، احتمال ورود نویزهای بیشتر در سری زمانی برداشت شده بیشتر می‌شود. مدت زمان اندازه‌گیری سرعت در هر نقطه بر مبنای آنالیز پایداری تعیین شد، یعنی طول مدت زمان برداشت داده‌ها در هر نقطه تا زمانی ادامه یافت که با افزایش زمان برداشت داده‌ها از این مدت زمان، تغییر محسوسی در پارامترهای آبخستگی ایجاد نشود. لازم بذکر است که آنالیز پایداری بعد از فیلترکردن سری زمانی داده‌ها انجام شد. برای فیلترکردن داده‌ها از روش ارایه شده توسط (Goring and Nikora 2002) استفاده شد. پس از فیلترکردن سری زمانی، حداقل تعداد سرعت‌های لحظه‌ای موجود در نقاط مورد بررسی 3000 عدد بوده که بیشتر از حد ارایه شده توسط Yaeger (2009) (حداقل 1000 داده) است. برای بررسی نحوه گسترش و مناطقی که آبخستگی از آنها آغاز می‌شود، دو آزمایش آبخستگی نیز همانند شرایط ارایه شده در جدول 1 انجام شد. برای انجام آزمایش‌های آبخستگی ابتدا سطح رسوبات بستر صاف شده و با استفاده از یک ورق فلزی نازک هم عرض کانال (جت) محافظت می‌شد. بعد از تنظیم عمق پایاب و دبی جریان جت‌ها، ورق فلزی از روی بستر به آرامی برداشته می‌شد تا فرایند آبخستگی آغاز شود. پس از شروع آبخستگی ابعاد حفره آبخستگی در زمانها مختلف با استفاده از عمق سنج برداشت شد.

3- آنالیز ابعادی

پارامترهای متعددی بر آبخستگی ناشی از جت‌های دوگانه آفست تأثیر گذار هستند. از جمله این پارامترها می‌توان به عمق پایاب (Y_t)، ضخامت جت (w)، فاصله قرارگیری دو جت نسبت به بستر (h_1 و h_2)، سرعت جت (U_j)، شتاب ثقل (g)، چگالی سیال (ρ)، قطر مصالح بستر (d_{50})، لزجت سیال (μ)، چگالی نسبی ذرات (s) و مدت زمان آزمایش‌ها (t) اشاره کرد (رابطه 1).

$$\phi = f(Y_t, w, h_1, h_2, U_j, g, \rho, d_{50}, \mu, s, t) \quad (1)$$

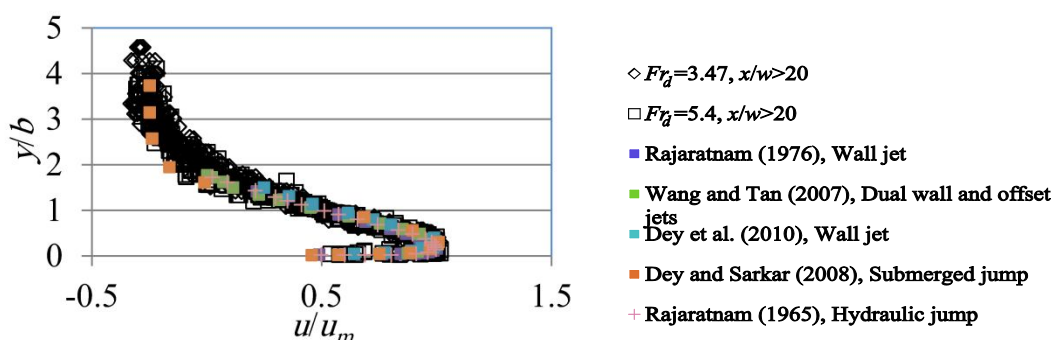


شکل 2 خطوط جریان پایین دست جت دوگانه آفست الف - $Fr_d = 5/4$ و ب - $Fr_d = 3/47$

دوگانه بررسی شده در تحقیق Wang and Tan (2007) دانست. محل اختلاط کامل دو جت آفست، یعنی نزدیکترین پروفیل عمقی سرعت به دیواره بالادست که تنها یک حداکثر موضعی سرعت در عمق دارد، برای پروفیل تا دهانه جت است، از دیواره بالادست و برای $Fr_d = 3/47$ در فاصله $X_m/w = 9/3$ که فاصله این پروفیل تا دهانه جت است، از دیواره بالادست $Fr_d = 5/4$ در فاصله $X_m/w = 11/33$ از دیواره بالادست ایجاد می‌شود. مقادیر X_m/w برای انواع جت‌های دوگانه موازی توسط Nasr and Lai, Ko and Lau (1989) و Wang and Tan (1997) و Wang and Tan (2007) به ترتیب 8/6، 10/5 و 6/4 گزارش شده است. طبق نظر Wang and Tan (2007) بعد از اختلاط کامل جت‌های دیواره‌ای و آفست، رفتار جریان شبیه جت‌های دیواره‌ای است. آنها برای اثبات ادعای خود از پروفیل‌های خود متشابه (شیوه‌ارایه شده توسط Wygnanski et al. 1994) در محدوده $X > X_m$ استفاده کردند. طبق این روش فاصله عمودی تا بستر با عرض نیمه جت (b فاصله از کف در محلی که سرعت به نصف سرعت حداکثر جت در آن مقطع می‌رسد) بی‌بعد شده و سرعت موضعی در هر مقطع با سرعت حداکثر در همان مقطع بی‌بعد می‌شود. شکل 3 نشان دهنده پروفیل‌های بی‌بعد شده سرعت طولی جریان برای دو آزمایش انجام شده است. در اینجا u سرعت در هر ارتفاع از بستر و u_m حداکثر سرعت در همان مقطع است. چنانچه ملاحظه می‌شود، پروفیل‌های بی‌بعد شده سرعت طولی در محدوده‌ای باریک قرار گرفته‌اند که تایید کننده وجود پروفیل‌های خود متشابه بعد از ناحیه اختلاط جت‌ها است.

چنانچه تحقیقات پیشین نشان داده است، فاصله جت آفست تا سطح آب و بستر، یکی از عوامل اصلی انحراف جت دیواره‌ای به سمت بستر یا سطح آب است. برای هر دو آزمایش حاضر، انحراف جت آفست دوم (قرار گرفته در ترازهای بالاتر) به سمت بستر، به دلیل نزدیک بودن بستر به خروجی جت و اثر کواندا است (Nasr and Lai, 2000). برای هر دو آزمایش، دو گردابه در حد فاصل دو جت بوجود آمده است (R2). ابعاد و اندازه‌های این دو گردابه تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد. در هر دو آزمایش، $X_c/w = 5/7$ که فاصله انتهای گردابه تشکیل شده بین دو جت تا دهانه جت است.

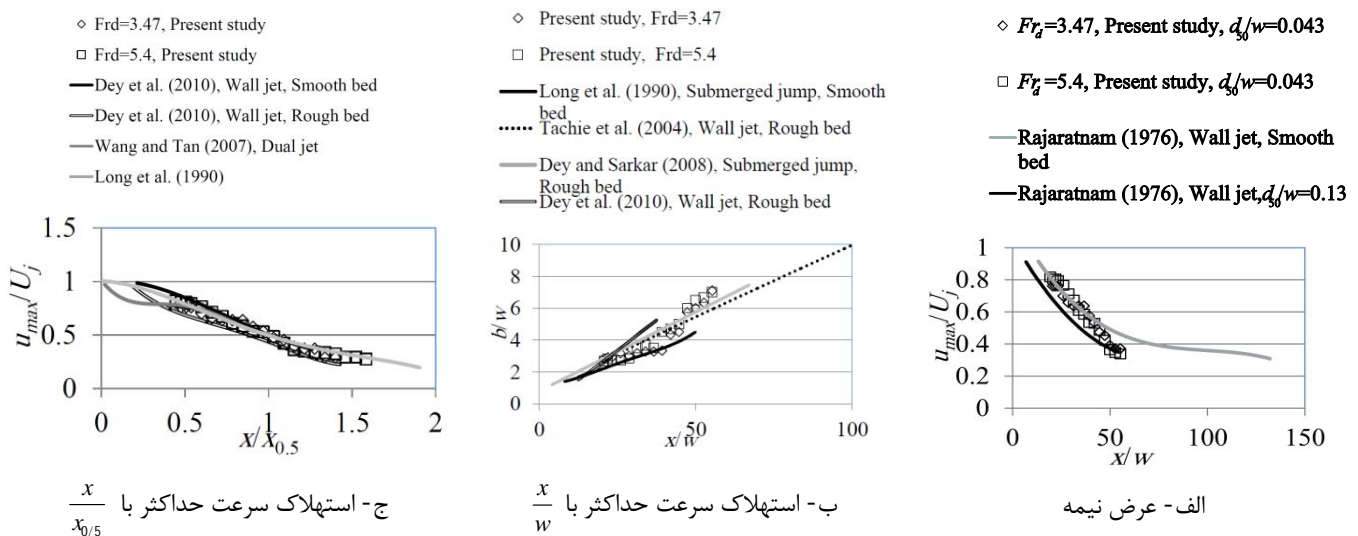
نتایج تحقیقات Nasr and Lai (1997) نشان داد که فاصله مرکز جریان برگشتی کوچک بین دو جت با نسبت انحراف جت $d/w = 3/25$ (در اینجا d فاصله بین دو جت است)، $X_c/w = 4/3$ است که کمتر از مقادیر ارایه شده در تحقیق حاضر است. چراکه نزدیک بودن جت آفست اول (جت آفست نزدیک به بستر) به بستر، سبب منحرف شدن جریان به سمت بستر شده و در نتیجه جریان برگشتی تشکیل شده بین دو جت وسیعتر خواهد شد. Ko and Lau (1989) برای شرایطی که نسبت انحراف جت کمتر از مقدار در تحقیق حاضر یعنی $d/w = 1/5$ است و Wang and Tan (2007) برای جت‌های دوگانه دیواره‌ای و آفست به ترتیب مقادیر $X_c/w = 1/75$ و $X_c/w = 0/75$ را ارایه کرده‌اند، که کمتر بودن این مقادیر نسبت به مقادیر ارایه شده در تحقیق حاضر را می‌توان مربوط به فاصله کمتر جت‌های



شکل 3 پروفیل‌های بی‌بعد شده سرعت در راستای طولی در پایین دست ناحیه اختلاط جت‌ها

های مربوط به توسعه جت‌های دیواره‌ای بر روی بستر زبرتر و بستر صاف است. مطالعه حاضر نشان می‌دهد بر خلاف نظر Wang and Tan (2007) که شباهت پروفیل‌های بی‌بعد شده سرعت با پروفیل‌های بی‌بعد شده سرعت جت‌های دیواره‌ای را شاخصه رفتار جت‌های دوگانه دیواره‌ای و آفست در پایین دست نقطه اختلاط جت‌ها اعلام کرده‌اند، استفاده از دو مؤلفه عرض نیمه جت و مقدار استهلاك سرعت حداکثر نیز باید به‌عنوان دو شاخصه مهم دیگر برای تعیین رفتار و شباهت جریان جت‌های دوگانه آفست در نظر گرفته شود. برای تعیین استهلاك سرعت حداکثر در طول مسیر جریان از طول نیمه ($x_{0.5}$ فاصله‌ای است که در آن سرعت حداکثر جریان، نصف سرعت جت‌ها می‌شود) برای بی‌بعد سازی فاصله تا دیواره بالادست استفاده شد. نتایج تحقیق حاضر به همراه نتایج تحقیقات سایر محققان برای جت‌های دیواره‌ای بر روی بستر صاف و زبرتر، پرش مستغرق و نیز جت‌های دوگانه دیواره‌ای و آفست ارائه شده است. تطابق مناسب بین داده‌های تحقیق حاضر و تحقیقات پیشین باز مؤید این مطلب است که برای فواصل بیشتر از 20 برابر قطر جت تا دیواره بالادست، استفاده از طول نیمه جت می‌تواند برای تعیین پروفیل‌های بی‌بعد استهلاك سرعت در مسیر جریان جت‌های دوگانه نیز کاربرد داشته باشد. البته ذکر این نکته لازم است که طول نیمه جت، نسبت به ضخامت جت برای بی‌بعد سازی فاصله از دیواره بالادست مناسب‌تر است، چراکه هماهنگی بیشتری با داده‌های تحقیقات پیشین دارد.

برای مقایسه، پروفیل بی‌بعد شده توسط سایر محققان از جمله Rajaratnam (1965), Rajaratnam (1976), Wang and Tan (2007), Dey and Sarkar (2008) و Dey et al. (2010) برای پرش هیدرولیکی آزاد، پرش هیدرولیکی مستغرق، بعد از ناحیه اختلاط جت‌های دیواره‌ای و آفست و جت‌های دیواره‌ای نیز در این شکل ارائه شده است. هماهنگی خوبی بین پروفیل‌های بی‌بعد شده تحقیق حاضر در پایین دست ناحیه اختلاط با پروفیل‌های بی‌بعد شده مربوط به تحقیقات پیشین وجود دارد که نشان دهنده این است که پروفیل‌های طولی سرعت در این ناحیه خود متشابه بوده و شکل بی‌بعد شده آنها شبیه پروفیل بی‌بعد شده جت‌های دیواره‌ای و پرش هیدرولیکی است. برای بررسی دقیقتر نواحی پایین دست اختلاط جت‌ها، تغییرات عرض نیمه جت و استهلاك سرعت حداکثر با فاصله تا دیواره بالادست ارائه می‌شود (شکل‌های 4 الف تا ج). برای بی‌بعد سازی سرعت حداکثر جریان از سرعت جت (U_j) و برای بی‌بعد سازی عرض نیمه جت (b) از ضخامت جت (w) استفاده شد. داده‌های سایر محققان نیز در این شکل‌ها ارائه شده است. مطابق این شکل در شرایط $\frac{x}{w} > 20$ هر دو مشخصه جریان یعنی عرض نیمه جت و استهلاك سرعت حداکثر جت، بر یکدیگر منطبق بوده که نشان دهنده انتخاب مناسب مقیاس‌های طولی و سرعت انتخاب شده در این تحقیق است. تطابق خوبی بین داده‌های تحقیق حاضر و جت‌های دیواره‌ای وجود دارد، بطوریکه داده‌های تحقیق حاضر در حد فاصل بین داده-



شکل 4 تغییرات مؤلفه‌های پروفیل سرعت در فاصله دور از دیواره بالادست

پروفیل‌های بی‌بعد ارایه شده با خطوط برازشی داده‌های سایر محققان روندهای یکسانی را نشان می‌دهد. تفاوت‌هایی در پروفیل‌های نوسانات سرعت بی‌بعد شده در جهت طولی مشاهده می‌شود (شکل 5-ب) که دلیل اصلی آن را می‌توان تفاوت در شرایط انجام آزمایش‌ها از جمله زبری بستر و عمق پایاب دانست. در شرایط بستر زبرتر مقدار حداکثر تنش برشی رینولدز بدون بعد، در ترازهای بالاتر جریان نسبت به بستر صاف قرار می‌گیرد که ناشی از تأثیرات بیشتر بستر زبرتر در این ترازهای بالاتر جریان است. انتخاب مناسب مقیاس‌های عمودی و سرعت موجب می‌شود که داده‌های مربوط به تنش‌های برشی رینولدز برای هر دو آزمایش بر روی یک نوار قرار بگیرند. در مورد نوسانات سرعت در راستای عمودی، اختلاف بین داده‌های تحقیق حاضر و Long et al. (1990) با داده‌های Dey et al. (2010) زیاد است، اما داده‌های تحقیق حاضر و نتایج Long et al. (1990) هماهنگی بهتری با داده‌های ارایه شده توسط Rajaratnam (1976) دارد (شکل 5-ج).

4-2- تخمین تنش برشی وارد بر بستر

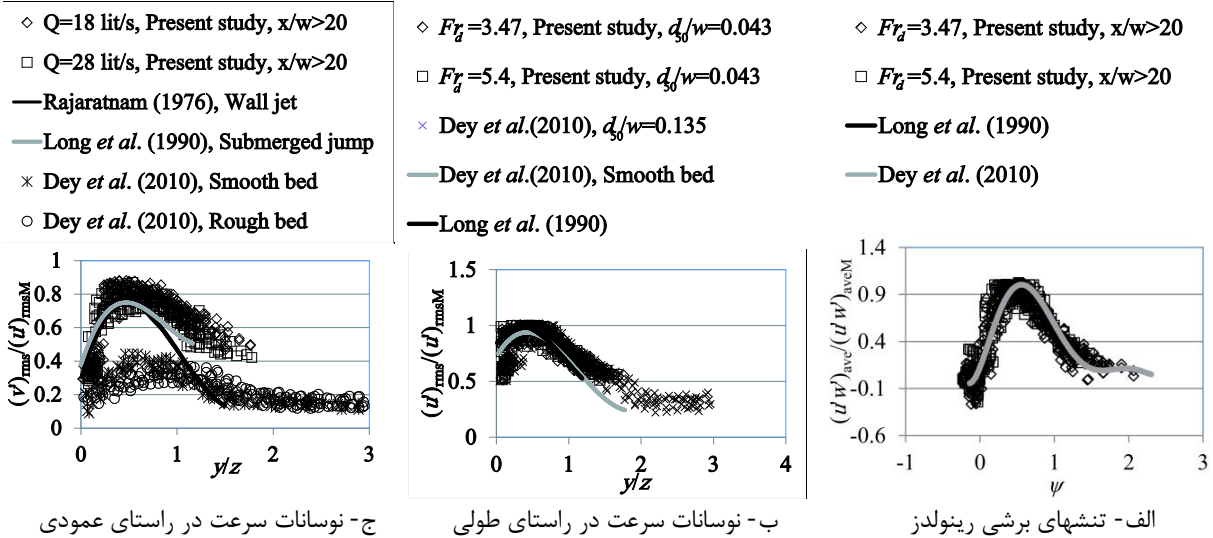
انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) یکی از پارامترهای مهم در تعیین میزان آشفتگی است. علاوه بر این انرژی جنبشی آشفتگی ارتباط نزدیکی با تنش برشی وارد بر بستر دارد. لذا بررسی این پارامتر می‌تواند در تعیین میزان آشفتگی در نقاط مختلف و نقاط مستعد آبشستگی مفید باشد.

مقایسه بین داده‌های جت‌های دیواره‌ای و پرش مستغرق با داده‌های Wang and Tan (2007) نیز نشان داد که در فاصله‌ای دور از محل اختلاط جت‌های دیواره‌ای و آفست، همبستگی مناسبی بین داده‌های این محققان و جت‌های دیواره‌ای وجود دارد، در حالی که در نزدیک دیواره بالادست پراکندگی بین داده‌ها کاملاً مشهود است.

برای بی‌بعد سازی پروفیل‌های تنش برشی رینولدز از دو مقدار عرض نیمه پروفیل تنش برشی رینولدز z (فاصله بستر از نقطه‌ای که $u'v' = \frac{(u'v')_{\max}}{2}$ و $\frac{\partial(-u'v')}{\partial y} > 0$)

و فاصله نقطه تنش برشی رینولدز صفر تا بستر (N) استفاده شد (شکل 5-الف). پارامترهای مختلفی برای بی‌بعد سازی پروفیل تنش برشی رینولدز استفاده شد و عرض نیمه جت که توسط Rajaratnam (1976) ارایه شد نیز مورد استفاده قرار گرفت، اما این مقیاس برای دستیابی به پروفیل‌های خود متشابه تنش‌های رینولدز مناسب نبود. مقیاس مناسب مورد استفاده در این تحقیق برای فواصل دور از جت‌های دوگانه آفست بصورت $\psi = \frac{y-N}{z-N}$ تعریف

و نتایج آن برای $\frac{x}{w} > 30$ در شکل 5-الف ارایه شده است. تشابه مناسبی بین پروفیل‌های بی‌بعد شده تحقیق حاضر وجود دارد. علاوه بر این، داده‌های مربوط به محققان پیشین مربوط به جت‌های دیواره‌ای و نیز پرش مستغرق برای مقایسه در این شکل ارایه شده است.

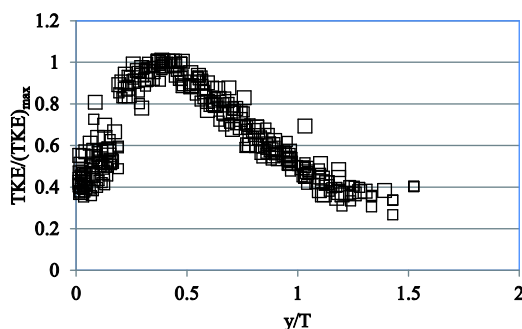
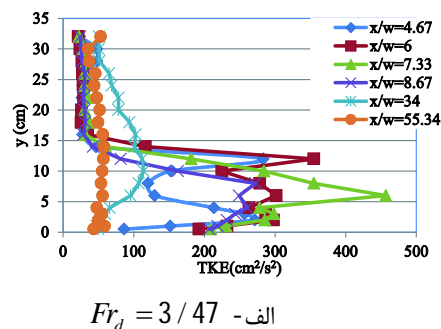
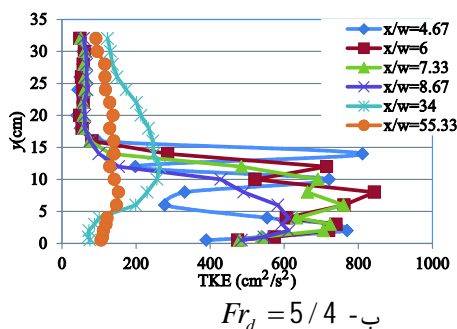


شکل 5 پروفیل‌های بی بعد شده پارامترهای آشفتگی

زیر ناحیه جریان برگشتی است. از سویی دیگر با افزایش فاصله از دیواره بالادست، در هر مقطع مقادیر قابل توجه انرژی جنبشی آشفتگی در محدوده وسیعتری از عمق جریان مشاهده می‌شود که نشان دهنده افزایش ضخامت لایه برشی در مقاطع پایین دست است. مقایسه بین مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی مربوط به دو آزمایش نشان می‌دهد که انرژی جنبشی آشفتگی در شرایط $Fr_d = 5.4$ تا 2 برابر انرژی جنبشی آشفتگی در $Fr_d = 3.47$ است. برای بی بعد سازی پروفیل‌های انرژی جنبشی در فواصل $\frac{x}{w} > 20$ ، از پارامتر حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی در هر مقطع برای بی‌بعدسازی مقدار انرژی جنبشی آشفتگی در هر نقطه از مقطع و از فاصله نقطه‌ای که انرژی جنبشی آشفتگی به مقدار نصف مقدار حداکثر آن در پروفیل می‌رسد تا بستر (T)، برای بی‌بعد سازی فاصله تا بستر استفاده شد. مطابق شکل 6- ج این دو پارامتر برای بی‌بعد سازی پروفیل‌های انرژی جنبشی آشفتگی در مقاطع مختلف مناسب هستند و داده‌ها بعد از بی‌بعد سازی بر روی یک نوار قرار می‌گیرند.

مطابق تحقیقات انجام شده پیشین ارتباط مستقیمی بین انرژی جنبشی آشفتگی و تنش برشی وارد بر بستر وجود دارد و محققان رابطه بین تنش برشی وارد بر بستر و انرژی جنبشی آشفتگی را بصورت رابطه‌ای خطی (رابطه 3) در نظر گرفته‌اند (Soulsby, 1983; Kim et al., 2000; Huthnance et al., 2002).

شکل‌های 6- الف و ب نشان دهنده پروفیل‌های عمقی انرژی آشفتگی در مقاطع مختلف است. برای $Fr_d = 3.47$ در مقاطع نزدیک خروجی جت دو مقدار حداکثری قابل توجه در پروفیل انرژی جنبشی آشفتگی دیده می‌شود. این مقادیر حداکثری، نه در محل حداکثر سرعت، بلکه در نواحی اطراف سرعت حداکثری شکل می‌گیرند. تعداد پیک‌ها برای $Fr_d = 5.4$ در نزدیک دهانه جت در 3 نقطه در عمق مشاهده می‌شود. اگر هر کدام از پیک‌ها در عمق نشان دهنده وجود یک لایه برشی باشد، تفاوت تعداد پیک‌ها را می‌توان مربوط به شبکه‌بندی درشت در عمق دانست که در $Fr_d = 3.47$ تعداد لایه‌های برشی کمتری را نشان می‌دهد. با فاصله گرفتن از دیواره بالادست، تنها یک مقدار حداکثری در انرژی جنبشی آشفتگی دیده می‌شود که مربوط به لایه برشی در بین جریان جت‌های تداخل یافته و جریان برگشتی در ترازهای بالایی جریان است. در سه مقطع ابتدایی، مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی با یکدیگر قابل مقایسه هستند و حتی در شرایط $Fr_d = 3.47$ ، انرژی جنبشی آشفتگی حداکثر در مقطع سوم نسبت به دو مقطع بالادست مقداری افزایش یافته است که دلیل آن می‌تواند نزدیکی و اندرکنش دو جت در این ناحیه باشد. در هر دو آزمایش، برای مقاطع $\frac{x}{w} > 7.33$ ، مقدار حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی روند کاهشی دارد و در ترازهای بالاتر منطبق بر ناحیه حد فاصل جریان برگشتی در بالای جت و جریان عبوری از



ج - شکل بی بعد شده پروفیل
 شکل 6 تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی در عمق

نوسانات سرعت در راستای عمودی نیز یکی دیگر از روش‌های مورد استفاده در تخمین تنش برشی وارد بر بستر است. مطابق تحقیقات Kim et al. (2000) تنش برشی وارد بر بستر ارتباطی خطی با نوسانات سرعت در راستای عمودی دارد و مقدار آن را می‌توان با استفاده از رابطه (5) بدست آورد (Kim et al. 2000).

$$\tau w' = C_2 \rho (\overline{w'^2}) \quad (5)$$

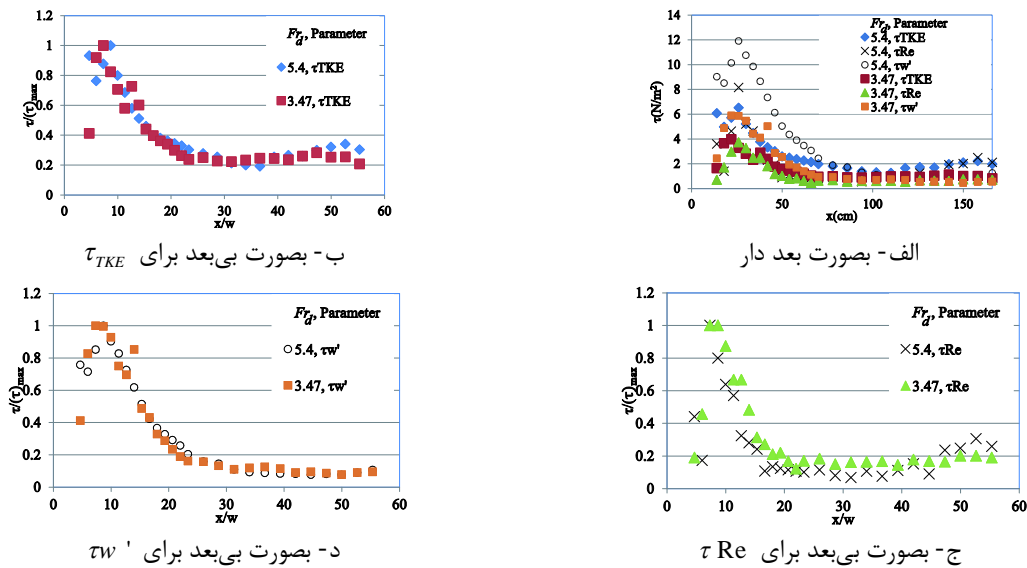
که در این رابطه $\tau w'$ تخمین تنش برشی بر مبنای نوسانات عمقی سرعت، ρ چگالی جرمی آب، w' نوسان مؤلفه سرعت در جهت z و C_2 ضریبی تجربی است. شکل 7- الف نشان دهنده تغییرات تنش برشی وارد بر بستر با استفاده از سه روش ارائه شده در بالا است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود حداکثر تنش برشی وارد بر بستر با استفاده از هر سه روش در فاصله $\frac{x}{w} = 7.33$ اتفاق افتاده و مقدار حداکثر تنش برشی وارد بر بستر در $Fr_d = 5.4$ بیشتر از $Fr_d = 3.47$ است. برای هر دو آزمایش انجام شده، در تنش‌های رینولدز بالا، مقدار تنش برشی وارد بر بستر با استفاده از روش نوسانات مؤلفه عمودی سرعت بیشتر از دو روش دیگر بوده، اما در تنش‌های رینولدز کمتر، مقادیر هر سه روش به یکدیگر نزدیک می‌شوند.

$$\tau_{TKE} = C_1 \times \rho \times TKE \quad (3)$$

در این رابطه τ_{TKE} تنش برشی تخمین زده شده از روش انرژی جنبشی آشفتگی بوده، ρ چگالی جرمی سیال و $C_1 = 0/19$ (Kim et al., 2000). استفاده از تنش‌های رینولدز نیز برای تخمین تنش‌های برشی وارد بر بستر یکی دیگر از روش‌های متداول است که در انواع جریان‌های دو بعدی و سه بعدی توسط محققان مختلف بکار رفته است (Biron et al., 2004, Duan 2009). برای تخمین تنش برشی وارد بر بستر می‌توان از رابطه (4) استفاده کرد (Duan 2009).

$$\begin{aligned} \tau Re &= \left((\tau x)^2 + (\tau z)^2 \right)^{0.5} \\ \tau x &= -\rho (\overline{u'v'} + \overline{u'w'}) \\ \tau z &= -\rho (\overline{v'w'} + \overline{u'w'}) \end{aligned} \quad (4)$$

که در این رابطه τx تنش برشی در راستای طولی، τz تنش برشی در راستای عرضی و τRe تخمین تنش برشی با استفاده از تنش‌های رینولدز است. از آنجایی که مقدار تنش برشی τz در مقایسه با مقدار تنش برشی τx بسیار کمتر است، در تحقیق حاضر از مقدار τz صرف‌نظر شده است و از τx به‌عنوان تخمینی از τRe استفاده شد. استفاده از



شکل 7 تغییرات تنش برشی وارد بر بستر

همبستگی بین روش‌های نوسانات عمقی سرعت و تنش‌های رینولدز را برای جریان اطراف آبشکن‌ها 0/73 ارائه کرده‌اند که کمتر از همبستگی بین این دو روش در تحقیق حاضر است. شکل 7 نشان می‌دهد که روش تخمین تنش برشی بر مبنای نوسانات عمقی سرعت بیشترین اختلاف را با دو روش دیگر دارد. از آنجایی که از داده‌های مربوط به جریان‌های دریایی برای کالیبراسیون ضرایب C_1 و C_2 استفاده شد، همبستگی بهتر بین روش‌های انرژی جنبشی آشفتگی و نوسانات عمقی سرعت توجیه می‌شود. حال آنکه برای کالیبراسیون این ضرایب در مورد جت‌ها اطلاعات آزمایشگاهی زیادی نیاز است، که هم اکنون در دسترس نیست. شکل‌های 7-ب و د نشان دهنده پروفیل‌های بی‌بعد شده تخمین تنش برشی وارد بر کف با استفاده از هر سه روش است. برای بی‌بعد سازی تخمین تنش برشی وارد بر کف از مقدار حداکثر تنش برشی وارد بر کف (مربوط به هر روش) استفاده شد و برای بی‌بعد کردن فاصله از دهانه جت، از میزان بازشدگی دهانه جت استفاده شد. چنانچه ملاحظه می‌شود با انتخاب این پارامترها، تنش‌های برشی وارد بر کف بصورت بی‌بعد تطابق نسبتاً خوبی با یکدیگر دارند.

3-4- تحلیل پدیده‌های چهارگانه آشفتگی

از آنجا که پدیده‌های چهارگانه آشفتگی سهم بسیار زیادی

حداکثر اختلاف بین مقادیر حداکثری تنش برشی با استفاده از روش‌های مختلف تا 200% است که این مقدار برای جریان‌های اطراف آبشکن‌ها حدود 167% گزارش شده است (Biron et al. 2004). مقادیر میزان همبستگی و اختلاف بین سه روش مورد استفاده توسط دو پارامتر آماری ضریب همبستگی R^2 و میانگین اختلاف بین مقادیر روش‌ها (رابطه 6) برحسب درصد در جدول 2 ارائه شده است.

$$AD = \sum_{k=1}^n \frac{|X_k^i - X_k^j|}{\min(X_k^i, X_k^j)} \times 100 \quad (6)$$

در این رابطه AD میانگین اختلاف بین مقادیر روش‌ها، k شمارنده نقاط، X_k^i و X_k^j مقادیر تنش‌های رینولدز محاسباتی از روش‌های i و j می‌باشد.

جدول 2 مقادیر درصد میانگین قدرمطلق اختلاف‌ها (AD) و ضریب همبستگی (R^2) بین روش‌های تخمین تنش برشی وارد

| | بر بستر | | | | | |
|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| | τ_{Re} | τ_{TKE} | $\tau_{w'}$ | τ_{Re} | τ_{TKE} | $\tau_{w'}$ |
| τ_{Re} | 0 | 55 | 115 | 1 | 0/8 | 0/65 |
| τ_{TKE} | 55 | 0 | 70 | 0/8 | 1 | 0/88 |
| $\tau_{w'}$ | 115 | 70 | 0 | 0/65 | 0/88 | 1 |

تحقیقات پیشین از جمله Biron et al. (2004) میزان

به جت، روندی افزایشی برای احتمال پدیده جارویی و بیرون رانی البته بصورت ضعیفتر مشاهده می شود و در همین محدوده روند کاهش احتمال پدیده اندرکنش رو به بیرون مشهود است. یعنی در نواحی نزدیک به جت با تبدیل احتمال پدیده اندرکنش رو به داخل به پدیده های بیرون رانی و جارویی، این پدیده ها تقویت می شوند، تا جایی که در فاصله $\frac{x}{w} = 7.33$ از ابتدای جت مقدار احتمال پدیده جارویی و بیرون رانی بیشترین مقدار را دارد. این فاصله برای هر دو آزمایش مورد بررسی تقریباً یکسان است. روند مشاهده شده برای پدیده اندرکنش رو به داخل به این ترتیب است که با افزایش فاصله از ابتدای جت، روندی افزایشی برای احتمال این پدیده مشهود است. مقدار عدد فرود مصالح بر روی مقادیر حداکثری احتمال پدیده های مورد مطالعه تأثیر چندانی ندارد، بطوری که برای هر دو آزمایش انجام شده، حداکثر احتمال تقریبی پدیده های اندرکنش رو به بیرون، بیرون رانی، اندرکنش رو به داخل و جارویی به ترتیب 31، 26، 33 و 33 درصد است. اگر چه در فواصل دور از دهانه جت، پدیده های اندرکنشی احتمال بیشتری دارند، اما با توجه به اینکه مقادیر تنش های رینولدز برشی در راستای جریان در این محدوده مثبت هستند، یعنی قدرت این پدیده ها علی رغم فرکانس کمتر تکرار آنها باید در این نواحی بیشتر باشد، اما در نزدیک دهانه جت، فرکانس بیشتر پدیده های جارویی و بیرون رانی به همراه قدرت بیشتر آنها با یکدیگر همبستگی خوبی دارند.

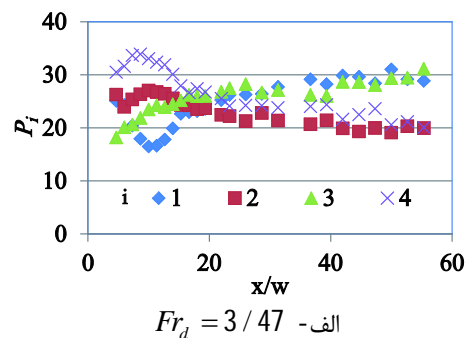
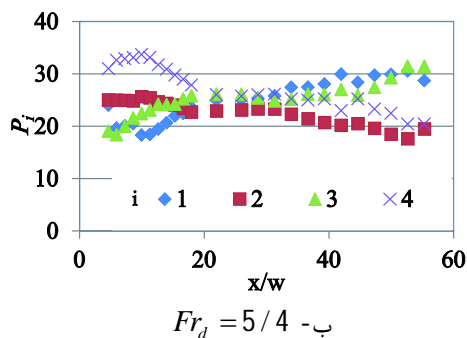
در انتقال مومنتم به بستر و انتقال رسوب دارند، بررسی و تعیین حاکمیت این نوع پدیده ها مهم و ارزشمند است. تعیین میزان حاکمیت این نوع پدیده ها با روش های مختلفی از جمله تعیین احتمال این پدیده ها انجام می شود. تعیین زوایای اعمال این پدیده ها نیز برای تعیین مولفه های مختلف اعمال این پدیده ها بر بستر که موجب انتقال رسوب می شوند و نیز بررسی پایداری این پدیده ها و تبدیل آنها به یکدیگر از مباحث مهم دیگر در بررسی پدیده های چهارگانه آشفستگی است.

4-4- احتمال ایجاد پدیده های انفجار آشفستگی

یکی از مشخصه های تعیین حاکمیت پدیده های آشفستگی در نزدیک بستر، استفاده از احتمال ایجاد این پدیده ها در سری زمانی است. برای تعیین این مشخصه از رابطه (7) استفاده می شود (مهرآیین و همکاران 1394 و Keshavarzi and Gheisi 2006).

$$p_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^4 n_j} \quad (7)$$

در این رابطه n_i تعداد پدیده i در سری زمانی بوده و p_i احتمال ایجاد پدیده i می باشد. شکل های 8 نشان دهنده احتمال ایجاد پدیده های مختلف در نزدیک بستر است. با توجه به این شکل ها در مناطق نزدیک به ابتدای جت، پدیده های بیرون رانی و جارویی احتمال بیشتری داشته، در حالی که در نواحی دور از ابتدای جت احتمال ایجاد پدیده های اندرکنشی بیشتر است. در ناحیه نزدیک



شکل 8 تغییرات احتمال پدیده های چهارگانه آشفستگی با فاصله از دهانه جت در لایه نزدیک بستر

4-5- زوایای اعمال پدیده‌ها

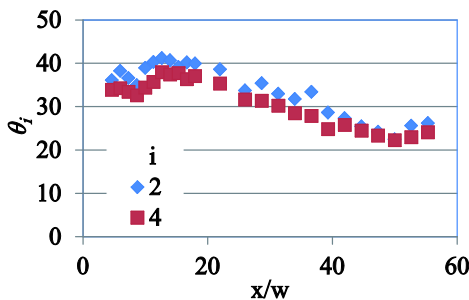
علاوه بر احتمال ایجاد پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی، زوایای اعمال این پدیده‌ها نیز در تعیین میزان توانایی جریان برای انتقال رسوبات و شناسایی نقاط مستعد برای آبستگي مهم هستند. برای تعیین زاویه میانگین پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی در نزدیک بستر از رابطه (8) استفاده می‌شود (مهرآیین و همکاران 1395 و Keshavarzi and Ball 1997).

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{v_i'}{u_i'} \right) \quad (8)$$

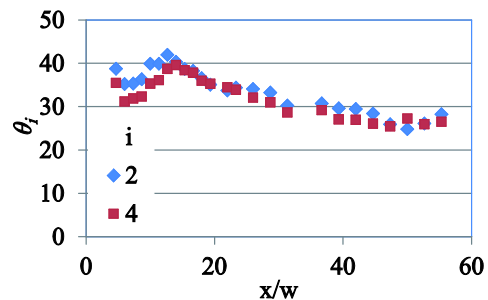
در این رابطه v_i' نوسانات مؤلفه عمقی سرعت مربوط به پدیده i و u_i' نوسانات مؤلفه طولی سرعت مربوط به پدیده i است. با کاهش زاویه اعمال پدیده‌ها نسبت به افق، تمایل جریان برای جابجایی رسوبات در راستای طولی زیاد می‌شود. شکل‌های 9 نشان دهنده تغییرات زوایای اعمال پدیده‌ها با فاصله از دیواره بالادست جت است. روند مشاهده شده برای هر دو آزمایش یکسان بوده و تغییرات پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی با فاصله از دهانه جت روندهای یکسانی را نشان می‌دهند. روشن است که مقادیر زوایای اعمالی پدیده‌های بیرون‌رانی، به مقدار کمی بیشتر از پدیده‌های جارویی می‌باشد. برای هر دو دبی مورد مطالعه تا فاصله حدود 22 cm از دهانه جت روند کاهشی زوایای اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی مشخص است، در حالی که در محدوده فاصله 22 cm تا 38 cm روند افزایشی زوایای اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی مشاهده می‌شود. در شرایط $Fr_d = 3/47$ و در محدوده $x > 50$ cm با افزایش فاصله از دهانه جت، روند کاهش زوایای اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی مشاهده می‌شود.

در محدوده مورد بررسی در شرایط $Fr_d = 5.4$ ، تغییرات زوایای اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی در فواصل دورتر نیز مشاهده می‌شود، بطوریکه تا فاصله 150 cm از دهانه جت هنوز روند کاهش زاویه اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی مشاهده شده و در فاصله $x > 150$ cm، زوایای اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی با تغییر فاصله تقریباً ثابت می‌شود. کاهش زاویه جت در محدوده نزدیک دهانه جت را می‌توان به دلیل شکل‌گیری گردابه در حد فاصل بین دو جت دانست، اما با نزدیک شدن جت آفست دوم و تمایل این جت به سمت بستر، زوایای اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی در نزدیک بستر افزایش می‌یابد. بعد از اختلاط دو جت به دلیل تأثیرگذاری جریان برگشتی در ترازهای بالایی جریان و انحراف خطوط جریان به سمت ترازهای بالا، زوایای اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی کاهش یافته و تا انتهای جریان برگشتی، باز هم روند افزایش زوایای پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی به دلیل حذف تأثیرات جریان برگشتی به تدریج ادامه می‌یابد.

حداقل زاویه پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی بعد از حذف تأثیرات جریان برگشتی اصلی مشاهده می‌شود و برای $Fr_d = 5.4$ حداقل زوایای اعمال این پدیده‌ها کمتر از $Fr_d = 3.47$ است. حداکثر زوایای اعمال این پدیده‌ها در محل برخورد جت آفست دوم با جت آفست اول مشاهده شده و این مقدار برای $Fr_d = 5.4$ کمتر از $Fr_d = 3.47$ است، چرا که در عددهای فرود مصالح بیشتر، با افزایش سرعت جریان روند نقل و انتقال بسته‌های سیال در نزدیک بستر با زوایای کمتری است.



ب- $Fr_d = 5.4$



الف- $Fr_d = 3.47$

شکل 9 تغییرات زوایای اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی با فاصله از نازل

4-6- پایداری و تبدیل پدیده‌ها

یکی دیگر از عوامل مهم که می‌تواند دیدی کاملتر نسبت به پدیده انفجار آشفتگی ارائه دهد، تبدیل و پایداری پدیده‌ها به یکدیگر می‌باشد، چراکه پایداری و یا تبدیل پدیده‌های چهارگانه به یکدیگر می‌تواند در فرایند انتقال رسوبات و یا ته نشینی آنها تأثیر داشته باشد. در هر نقطه برای سری زمانی در دسترس برای تعیین پایداری و تبدیل پدیده‌ها به یکدیگر می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد (Mianaei and Keshavarzi 2008).

$$p_{ij} = \frac{n_{i(t) \rightarrow j(t+\Delta t)}}{n_i} \times 100$$

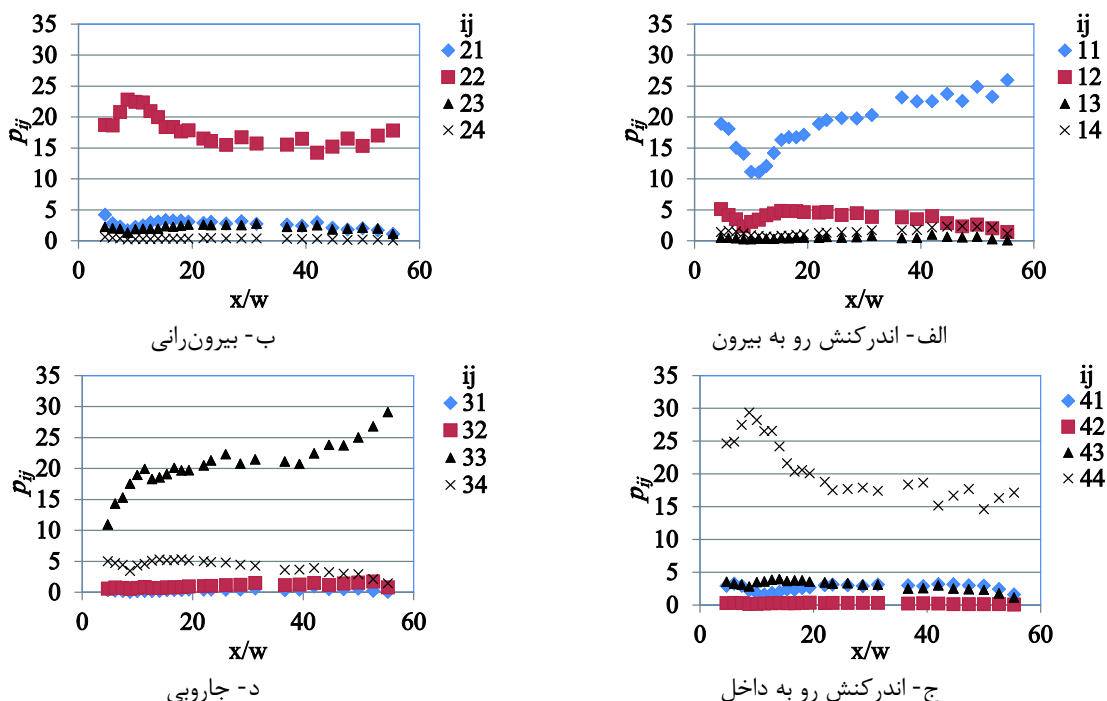
$$n_i = \sum_{j=1}^4 \sum_{t=0}^T n_{i(t) \rightarrow j(t+\Delta t)} \quad (9)$$

در این رابطه $n_{i(t) \rightarrow j(t+\Delta t)}$ تعداد تبدیل پدیده i به j از زمان t به $t + \Delta t$ و p_{ij} درصد احتمال تبدیل پدیده i به j در طول سری زمانی است. اگر $i=j$ باشد، p_{ii} احتمال پایداری یک پدیده در طول مدت زمان اندازه‌گیری سرعت است. شکل‌های 10 نشان دهنده احتمال تبدیل و پایداری پدیده‌ها در طول مدت زمان انجام آزمایش‌ها در لایه

نزدیک بستر است.

چنانچه از شکل‌ها مشخص است بیشترین احتمال تبدیل پدیده‌ها مربوط به پایداری آنها یعنی p_{11} ، p_{22} ، p_{33} و p_{44} بوده و کمترین احتمال تبدیل پدیده‌ها مربوط به p_{42} ، p_{24} ، p_{43} و p_{34} است. این ویژگی نشان دهنده این است که در زمان‌های پایایی انتظار تکرار پدیده چهارگانه‌ای که در ابتدای زمان شروع شده است، بیشتر از تبدیل به سایر پدیده‌ها است.

بخصوص احتمال تغییر همزمان علامت‌های نوسانات سرعت‌های عمقی و طولی کمترین مقدار را دارد. این روند هماهنگی خوبی با جریان عبوری از روی تل‌ماسه‌ها دارد (Mianaei and Keshavarzi 2008). در فاصله دهانه جت تا محل برخورد جت آفست دوم با جت آفست اول ($x=38 \text{ cm}$)، کاهش پایداری پدیده اندرکنش رو به بیرون موجب افزایش تبدیل به پدیده‌های بیرون‌رانی، جارویی و اندرکنش رو به داخل می‌شود. این تبدیل به همراه افزایش شدید پایداری پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی سهم مهمی در انتقال رسوبات و مستعد بودن این ناحیه برای آبشستگی دارد.



شکل 10 پایداری و تبدیل پدیده‌ها به یکدیگر (برای $Fr_d = 3.47$)

پیشین وجود دارد، در این قسمت، مقایسه‌ای با نظرات تحقیقات پیشین در مورد ارتباط میدان جریان نزدیک بستر جت‌های آفست دوگانه با آبشستگی در زمان شروع فرایند آبشستگی ارائه می‌شود.

مشاهدات کیفی آبشستگی نشان داد که در لحظات ابتدایی شروع آبشستگی ذرات رسوب عمدتاً بصورت بار معلق و کمتر بصورت بار بستر از محل برخورد جت به بستر دور می‌شوند. بعد از گذشت چندین دقیقه از شروع آبشستگی، شدت انتقال رسوبات کمتر شده و انتقال رسوبات عمدتاً بصورت بار بستر (انتقال لغزشی و غلطشی) بود. بر طبق مشاهدات فاصله ناحیه‌ای که آبشستگی از آن آغاز می‌شود، برای هر دو دبی مورد مطالعه در فاصله حدود 20-30 cm از دهانه جت است.

با تزریق ماده رنگی داخل حفره آبشستگی مشخص شد که الگوی جریان درون حفره آبشستگی را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: (جریان‌های u و v در شکل 11). جریان u قسمتی از جریان خروجی از درون حفره است که با عبور از روی برآمدگی تشکیل شده در انتهای حفره به سمت پایین دست کانال حرکت می‌کند. این جریان موجب انتقال مصالح خارج شده از درون حفره به پایین دست می‌شود. جریان v قسمتی از جریان خروجی است که در اثر برخورد به دیواره پایین دست حفره آبشستگی به سمت بالادست منحرف می‌شود. این جریان بعد از برخورد، به صورت جریان چرخشی $H1$ به سمت بالادست حرکت می‌کند و موجب آبشستگی بیشتری در نزدیکی کناره دیواره کانال نسبت به سایر نواحی در عرض کانال می‌شود ($S1$ در شکل 12) قسمتی از جریان $H1$ نیز که با $H11$ در شکل 11 نمایش داده شده است در اثر برخورد به دیواره بالادست کانال، جریان چرخشی $H2$ را بوجود می‌آورد که باعث آبشستگی در بالادست نیز می‌شود ($S2$ در شکل 12). پدیده انفجار آشفستگی، موجب تخریب دیون‌های مهاجر در حفره آبشستگی شده و سبب پخش مصالح قرار گرفته بر روی دیون در جهات مختلف می‌شود. تشکیل دیون‌ها به وسیله جریان جت و تخریب آنها به وسیله پدیده انفجار آشفستگی، یک فرایند چرخشی بود که در ابعاد حفره آبشستگی تأثیر چندانی نداشت. اگرچه در زمان‌های ابتدایی آبشستگی، شدت آن بیشتر بود و مصالح با حرکات

در محدوده $x > 38$ cm با افزایش فاصله از دهانه جت، روند کاهش احتمال پایداری پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی و افزایش پایداری پدیده اندرکنش رو به بیرون مشاهده می‌شود. در طول مسیر جریان جت، پایداری پدیده اندرکنش رو به داخل روندی افزایشی دارد. در نقاط نزدیک به دهانه جت، پایداری پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی بیشتر از پدیده‌های اندرکنشی است. در حالی که در مناطق دور از دهانه جت، پایداری پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی کمتر از پدیده‌های اندرکنشی است. علاوه بر این پایداری پدیده‌های اندرکنشی در پایین دست منطقه جریان برگشتی بتدریج کاهش یافته، در حالی که پایداری پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی به تدریج افزایش می‌یابند.

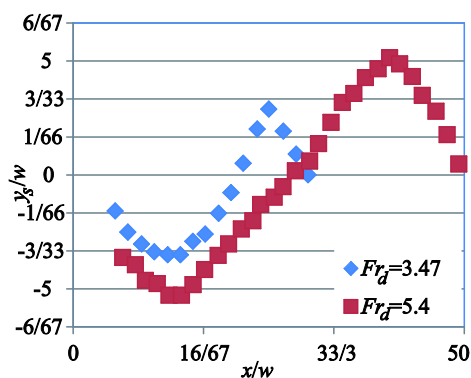
4-7- ارتباط بین میدان جریان و آبشستگی

بررسی پارامترهای آشفستگی در نزدیک بستر برای تعیین ارتباط بین آبشستگی و فرایند ساختارهای منسجم توسط بسیاری از محققان انجام شده است (Keshavarzi and Dey and Sarkar, Biron et al. 2004, Gheisi 2006, Mianaei and Keshavarzi, Bey et al. 2007, 2008). با مروری بر تحقیقات پیشین مشخص می‌شود که هر کدام از محققان از پارامتری خاص برای یافتن ارتباط بین میدان جریان در نزدیک بستر، حالت و میزان آبشستگی استفاده کرده‌اند. (Biron et al. (2004 و Dey and Sarkar (2007) از تخمین تنش برشی وارد بر بستر برای تعیین ارتباط بین پدیده انتقال رسوب و میدان جریان آشفته استفاده کردند، در حالی که Yaeger (2009) معتقد است برای جریان‌های سه بعدی پیچیده، بین مقادیر تنش برشی وارد بر بستر و میزان آبشستگی ارتباطی وجود ندارد. (Keshavarzi and Ball (1997 و Keshavarzi and Gheisi (2006) از تحلیل کوادرنانت، پایداری و زوایای اعمال پدیده‌های چهارگانه برای بررسی نقاط مستعد تجمع رسوبات و آبشستگی استفاده کردند. مهرآیین و همکاران (1394) و مهاجری و همکاران (1394) نیز از این روش استفاده و ثابت کردند که به خوبی می‌توان از تحلیل کوادرنانت برای تعیین حاکمیت پدیده‌های چهارگانه آشفستگی بر روی بستر زبر استفاده کرد. با توجه به این هماهنگی‌ها و تناقضاتی که در تحقیقات

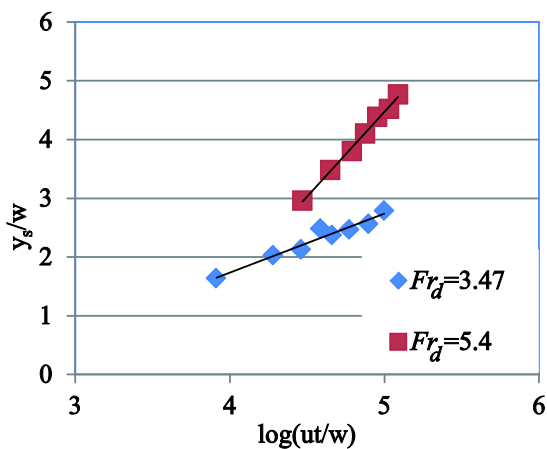
توپوگرافی بستر و به تبع آن میدان جریان، امکان برقراری ارتباط بین میدان جریان برداشت شده بر روی کف صلب و فرایند آبشستگی بعد از گذشت مدت زمانی از ابتدای فرایند آبشستگی، با توجه به جمع آوری داده‌های میدان جریان بر روی بستر صلب، وجود ندارد. شکل 14 تغییرات زمانی حداکثر عمق حفره آبشستگی را برای دو دبی مورد مطالعه نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود، حداکثر عمق حفره آبشستگی برای عدد فرود مصالح بیشتر با نرخ بیشتری در زمان‌های ابتدای آبشستگی ادامه می‌یابد.

نتایج قبلی نشان داد که حداکثر میزان تنش برشی وارد بر بستر با استفاده از هر سه روش مطالعه شده در فاصله

$$\frac{x}{w} = 7.33 \text{ از دهانه جت ایجاد می‌شود.}$$

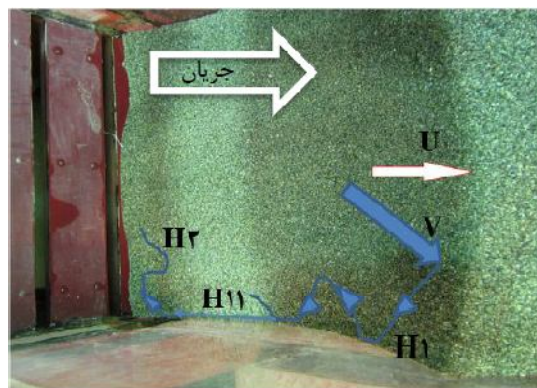


شکل 13 پروفیل طولی حفره آبشستگی برای دو دبی آزمایش شده

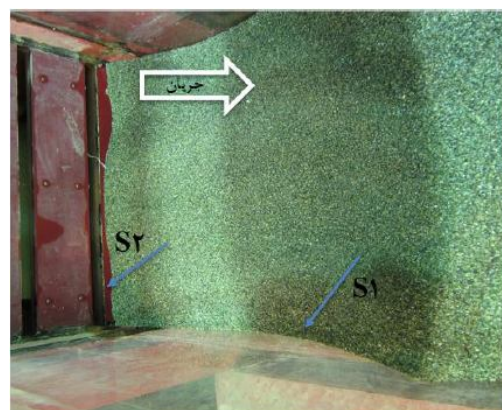


شکل 14 تغییرات حداکثر عمق آبشستگی با زمان برای دو آزمایش مطالعه شده

غلطشی و لغزشی از درون حفره آبشستگی خارج می‌شدند، اما با گذشت زمان از سرعت آبشستگی کاسته شده و تغییرات بسیار ناچیزی در ابعاد حفره آبشستگی پدید می‌آورد.



شکل 11 جریان‌های کیفی مشاهده شده در پلان برای جت‌های آفست برخوردی



شکل 12 آبشستگی ایجاد شده توسط جت‌های آفست دوگانه (پلان)

شکل 13 نشان دهنده پروفیل‌های نهایی حفره آبشستگی است. شکل پروفیل حفره آبشستگی مشابه پروفیلی است که با عنوان پروفیل‌های تیپ A در تحقیقات کلز و همکاران (2001) معرفی شده است. در این نوع حفره‌های آبشستگی به دلیل عمق زیاد پایاب، جریان جت به سمت بستر بوده و در طول زمان انحرافی به سمت ترازهای بالاتر ندارد.

با توجه به اینکه مطالعات میدان جریان انجام شده در این تحقیق مربوط به میدان جریان بر روی بستر صلب است، لذا ارتباط بین پارامترهای آشفتگی در نزدیک کف و انتقال رسوب در لحظات ابتدایی امکان‌پذیر است. با تغییر

انتقال بار رسوبات عمدتاً بصورت بار معلق است و تحقیقات Nychas et al. (1973), Drake et al. (1988), Thorne et al. (1995), Nelson et al. (1989) نشان داده است که حاکمیت پدیده‌های جاروبی عامل اصلی حمل رسوبات است. Grass (1971) و Nakagawa and Nezu (1978) دریافتند که پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی بیشترین سهم را در حمل و ته نشینی رسوبات در جریان‌های آشفته دارند. در تحقیق حاضر پایداری بیشتر پدیده‌های جاروبی و بیرون‌رانی، اگر به‌عنوان پارامتری برای تعیین حاکمیت این پدیده‌ها در نظر گرفته شود، با مطالعات Bey et al. (2007) همخوانی نداشته، چرا که پایداری پدیده بیرون‌رانی کمتر از پدیده جاروبی بوده، اما انتقال رسوبات بصورت بار معلق انجام می‌شود. اما پایداری پدیده جاروبی همخوانی خوبی با تحقیقات Nychas et al. (1973), Drake et al. (1988), Thorne et al. (1989), Nelson et al. (1995) داشته که پدیده جاروبی را عامل اصلی حرکت رسوبات معرفی می‌کنند. حداکثر بودن مقدار احتمال پدیده جاروبی در نقطه شروع آبهستگی نیز با مطالعات اشاره شده همخوانی دارد، اگر چه در نقاط دور از دهانه جت استفاده از احتمال پدیده‌ها به‌عنوان پارامتر مشخصه پدیده حاکم با این تحقیقات نتایج مناسبی ارائه نمی‌دهد. از سویی دیگر احتمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی پارامترهای مشخصه مناسبی برای مقایسه میزان آبهستگی در دو آزمایش انجام شده در این تحقیق نیستند، چراکه باوجود تفاوت بسیار زیاد نرخ آبهستگی در دو آزمایش، مقادیر احتمال ایجاد پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی تقریباً یکسان است. حداکثر بودن تنش برشی وارد بر بستر در محدوده‌ای که آبهستگی از آن آغاز می‌شود، نیز دلیلی بر این واقعیت است که پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در این ناحیه حاکمیت دارند، چرا که تنش‌های برشی محاسبه شده از تنش‌های برشی رینولدز، میانگین وزنی پدیده‌های چهارگانه را نشان می‌دهند و مقادیر مثبت به همراه بزرگتر بودن آنها در هر ناحیه نشان دهنده حاکمیت پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در آن ناحیه است. کمتر بودن تنش برشی در فاصله‌ای از نازل نیز نشان دهنده این است که تنش‌های برشی وارد بر بستر که از هرکدام از سه روش بیان شده در این تحقیق بدست

بیشترین احتمال ایجاد پدیده‌های جاروبی و بیرون‌رانی نیز در این محدوده شناسایی شد و پایداری پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در این ناحیه یک حداکثر موضعی دارند. زوایای اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی نیز دقیقاً در فاصله ذکر شده یک حداکثر موضعی دارند. کاهش تنش برشی وارد بر بستر در محدوده $\frac{x}{w} = 7.33$ نشان دهنده این است که تمایل جریان برای انتقال رسوبات در این محدوده کمتر خواهد شد. از سویی دیگر افزایش احتمال پدیده‌های اندرکنشی در این محدوده می‌تواند یکی از دلایل کاهش تنش برشی وارد بر بستر باشد. Keshavarzi and Gheisi (2006) زوایای کمتر پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی را برای تعیین نقاط مستعد آبهستگی استفاده کرده‌اند، در حالی که اگر چنین استدلالی برای ارتباط بین پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی صحیح باشد، باید آبهستگی در نقاط دور از جت که زوایای پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در آنها کمتر است، از نظر زمانی، قبل از نقاط نزدیک دهانه جت شروع شود که با فیزیک مسأله و مشاهدات این تحقیق همخوانی ندارد. از سویی دیگر وجود احتمال بیشتر پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی که دلیلی برای آبهستگی بیان شده است و احتمال بیشتر پدیده‌های اندرکنشی که دلیلی برای ته نشینی رسوبات دانسته شده است، نیز با مشاهدات این تحقیق همخوانی ندارد، چراکه در فواصل دور از جت که پدیده‌های اندرکنشی احتمال بیشتری دارند، نمی‌توان انتظار داشت که با عبور جریانی به سمت پایین دست، ته‌نشینی رسوبات در این ناحیه اتفاق بیفتد. بحث در مورد پایداری پدیده‌ها و میزان تبدیل آنها به یکدیگر نیز یکی دیگر از موارد مورد توجه محققان است (Mianaei and Keshavarzi 2008). مطابق تحقیقات این محققان بر روی تلماسه‌ها، در نقاطی که امکان آبهستگی وجود دارد، پایداری پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی بیشتر است. روندها ارائه شده با نتایج تحقیق حاضر هماهنگی دارد، چنانچه پایداری پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در نقاطی که آبهستگی از آنجا آغاز می‌شود، مقادیر حداکثری دارد. طبق تحقیقات انجام شده توسط Bey et al. (2007) شرایطی که حاکمیت پدیده‌های بیرون‌رانی وجود دارد،

5- نتیجه گیری

در این تحقیق برای اولین بار بررسی میدان جریان ایجاد شده توسط دو جت آفست انجام شد. هدف از این تحقیق تحلیل میدان جریان این نوع جت‌ها با استفاده از پارامترهایی همچون سرعت‌های میانگین، تنش‌های رینولدز و تخمین تنش‌های برشی وارد بر بستر بود. همچنین در این تحقیق بررسی پدیده‌های چهارگانه آشفستگی با استفاده از احتمال ایجاد این پدیده‌ها، زوایای اعمال این پدیده‌ها و نیز پایداری و تبدیل این پدیده‌ها به یکدیگر انجام شد و ارتباط بین میدان جریان و آشفستگی نیز در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که انتخاب پارامترهای عرض نیمه پروفیل جریان برای بی‌بعد سازی فاصله از بستر و حداکثر سرعت موجود در پروفیل جریان برای دستیابی به پروفیل‌های عمقی سرعت که مشابه هستند، مناسب است. برای دستیابی به پروفیلی بی‌بعد که نحوه استهلاک حداکثر سرعت جت را در امتداد طولی نشان دهد، استفاده از عرض جت و نیز فاصله طولی نقطه‌ای که سرعت حداکثر در آن، نصف سرعت حداکثر جت‌ها می‌شود، مناسب است. برای بی‌بعد سازی فاصله، از فاصله افقی از دهانه جت و برای بی‌بعد سازی سرعت از سرعت میانگین جت‌های خروجی استفاده شد. هماهنگی خوبی نیز بین پروفیل‌های بی‌بعد شده سرعت و حداکثر سرعت در این تحقیق و تحقیقات انجام شده توسط سایر محققان وجود دارد. بی‌بعد سازی پروفیل نوسانات سرعت در راستای طولی و در راستای عمقی با انتخاب حداکثر نوسانات این پارامترها در هر پروفیل برای بی‌بعد سازی نوسانات سرعت و انتخاب عرض نیمه پروفیل تنش رینولدز بهترین نتایج را ارائه داد. اگرچه پروفیل بی‌بعد شده نوسانات سرعت در راستای طولی تطابق خوبی با سایر تحقیقات انجام شده داشت، اما تفاوت‌هایی بین پروفیل بی‌بعد شده مؤلفه عمقی سرعت در مراجع مختلف وجود دارد. انتخاب پارامتری که عرض نیمه پروفیل تنش رینولدز و نیز فاصله نقطه‌ای از بستر که تنش برشی رینولدز در آن صفر شده تا بستر را در خود داشته باشد، برای بی‌بعد سازی فاصله قرارگیری نقطه تا بستر، در بی‌بعد سازی پروفیل تنش برشی رینولدز لازم

آمده‌اند، با فرایند آغاز آشفستگی همخوانی خوبی دارند. تخمین تنش برشی وارد بر کف با استفاده از روش تنش‌های رینولدز یکی از عوامل شناسایی نحوه حرکت بسته‌های سیال در نزدیک کف است. از آنجایی که این تنش‌های برشی نشان دهنده متوسط وزنی پدیده‌های چهارگانه هستند، لذا می‌توان دریافت که در بیشتر زمان عبور جریان از روی کف، پدیده‌های بیرون رانی و جاروبی قدرت بیشتری دارند. در شرایطی که پدیده بیرون رانی اتفاق می‌افتد، به دلیل جدا شدن بسته‌های سیال از نزدیک بستر و انتقال آنها به ترازهای بالاتر، پدیده جاروبی در این ناحیه تقویت می‌شود. یعنی انتقال این بسته‌های سیال به ترازهای بالاتر، موجب می‌شود بسته‌های سیال دیگری از ترازهای بالاتر به تراز نزدیک بستر هجوم آورده و پدیده‌های جاروبی را تشکیل دهند. این فرایند انتقال بسته‌های سیال از نزدیک بستر و هجوم بسته‌های سیال از ترازهای بالاتر، در شرایطی که پدیده‌های بیرون رانی و جاروبی شکل می‌گیرد، تکرار می‌شوند و در نتیجه قدرت حمل رسوبات توسط جریان را افزایش می‌دهند. از سویی دیگر تحقیقات محققان پیشین نشان داده است که عامل اصلی تولید انرژی جنبشی آشفستگی در نزدیک بستر، پدیده‌های جاروبی و به تبع آن پدیده‌های بیرون رانی هستند. به عبارت دیگر تغییرات هماهنگ تنش‌های برشی وارد بر بستر برای مقادیر محاسباتی با استفاده از تنش‌های رینولدز و با استفاده از انرژی جنبشی آشفستگی می‌تواند ناشی از همین عامل باشد، بطوریکه در مناطقی که تنش‌های برشی محاسباتی از تنش‌های رینولدز افزایش پیدا کرده، تنش‌های برشی محاسباتی بدست آمده از انرژی جنبشی آشفستگی نیز افزایش یافته که به دلیل وجود پدیده‌های بیرون رانی و جاروبی قوی در این نواحی است. لازم بذکر است که با توجه به اینکه ارتباط بین پدیده آشفستگی و آشفستگی میدان جریان در نزدیک بستر بسیار پیچیده است، نتایج این بخش، تنها برای بررسی میزان هماهنگی با سایر تحقیقات، ارائه شده است و برای رد یا قبول این نظرات و تعیین محدودیت استفاده از هر کدام از آنها نیاز به انجام آزمایش‌هایی با دامنه وسیعی از متغیرها در شرایط مختلف است.

| | | |
|-------------------|---|---|
| Q | دبی جریان | است. با این انتخاب پروفیل بی‌بعد شده تنش برشی |
| R^2 | ضریب همبستگی | رینولدز تطابق خوبی با تحقیقات پیشین دارد. باوجود |
| Re | عدد رینولدز | اینکه روش‌های متعدد مختلفی برای تخمین تنش برشی |
| s | چگالی نسبی ذرات | وارد بر بستر با استفاده از پارامترهای آشفستگی ارایه شده |
| t | مدت زمان آزمایشات | است، اما اختلاف‌هایی بین مقادیر ارایه شده در این |
| U_j | سرعت جت | روش‌ها وجود دارد. از نظر روند ارایه شده در تخمین |
| u_i' | نوسانات مؤلفه طولی سرعت مربوط به پدیده i | تنش‌های برشی، روش‌های مختلف نتایج مشابهی ارایه |
| u' | نوسانات سرعت طولی | می‌کنند و روش نوسانات عمقی سرعت بیشترین مقدار |
| u_{max} | سرعت حداکثر جریان | تنش برشی تخمین زده شده را ارایه می‌کند. نتایج حاصل |
| v' | نوسانات سرعت عرضی | از بررسی‌های پدیده‌های چهارگانه آشفستگی نشان دهنده |
| v_i' | نوسانات مؤلفه عمقی سرعت مربوط به پدیده i | این است که احتمال ایجاد پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی |
| w | میزان بازشدگی جت‌ها | در نزدیک جت بیشتر بوده، حال آنکه پدیده‌های |
| w' | نوسانات سرعت عمقی | اندرکنشی در فواصل دور از دهانه جت احتمال بیشتری |
| X_c | فاصله انتهایی گردابه تشکیل شده بین دو جت تا دهانه جت | دارند. پایداری پدیده‌ها بیشتر از تبدیل آنها به یکدیگر |
| X_m | فاصله پروفیل سرعتی که یک حداکثر در عمق دارد تا دهانه جت | بوده و روند مشابه برای تغییرات زوایای اعمال پدیده‌های |
| $X_{0.5}$ | فاصله‌ای که در آن سرعت حداکثر جریان، نصف سرعت جت‌ها شود | بیرون‌رانی و جاروبی برای هر دو آزمایش انجام شده |
| X_k^i و X_k^j | مقادیر تنش‌های رینولدز محاسباتی از روش‌های i و j | مشاهده شد. فرایند آشفستگی با تغییرات تنش برشی وارد |
| y_s | عمق حفرة آشفستگی | بر بستر همبستگی مناسبتری نسبت به سایر پارامترهای |
| Y_t | عمق پایاب | آشفستگی در نظر گرفته شده در نزدیک بستر دارد. |
| z | عرض نیمه پروفیل تنش برشی رینولدز | |
| θ_i | زوایای اعمالی پدیده i | |
| ρ | چگالی جرمی سیال | |
| τ_{TKE} | تنش برشی تخمین زده شده از روش انرژی جنبشی آشفستگی | |
| τRe | تنش برشی تخمین زده شده از روش رینولدز | |
| τx | تنش برشی در راستای طولی | |
| τz | تنش برشی در راستای عرضی | |
| $\tau w'$ | تنش برشی تخمین زده شده از روش نوسانات عمقی سرعت | |
| μ | لزجت سیال | |

6- فهرست علائم

| | |
|--------------------------------------|--|
| AD | میانگین اختلاف بین مقادیر روش‌ها |
| b | عرض نیمه جت |
| d | فاصله بین دو جت |
| d_{50} | قطر ذرات بستر |
| Fr_d | عدد فرود مصالح |
| g | شتاب ثقل |
| h_1 | ارتفاع قرار گیری جت آفست اول تا بستر |
| h_2 | ارتفاع قرار گیری جت آفست دوم تا بستر |
| k | شمارنده نقاط |
| N | فاصله نقطه تنش برشی رینولدز صفر تا بستر |
| n_i | تعداد پدیده i در سری زمانی |
| $n_{i(t) \rightarrow j(t+\Delta t)}$ | تعداد تبدیل پدیده i به j از زمان t به $t + \Delta t$ |
| p_i | احتمال ایجاد پدیده i |
| p_{ij} | درصد احتمال تبدیل پدیده i به j در طول سری زمانی |

7- منابع

مهرآیین م، نوربخش م، و قدسیان م. (1394). بررسی میدان جریان آشفته اطراف آبشکن T شکل مستغرق نشریه هیدرولیک - دوره 15، شماره 3، صص. 171-178.

- Grass, A. J. (1971). "Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries", *Journal of Fluid Mechanics*, 50(2), pp.233–255.
- Holland, J. T., and Liburdy, J. A. (1990). "Measurements of the thermal characteristics of heated offset jet." *Int. J. Heat. Mass. Tran.* 33(1), pp.69–78.
- Huthnance, J. M., Humphery, J. D., Knight, P. J., Chatwin, P. G., Thomsen, L., and White, M. (2002). "Near-bed turbulence measurements, stress estimates and sediment mobility at the continental shelf edge", *Prog. Oceanogr.*, 52(2–4), pp.171–194.
- Keshavarzy, A. R. and Ball, J. E. (1997). "An analysis of the characteristics of rough bed turbulent shear stresses in an open channel", *Stoch. Env. Res. Risk. A.* 11, pp.193–210.
- Keshavarzy, A.R. and Gheisi, A.R. (2006). "Stochastic nature of three dimensional bursting events and sediment entrainment in vortex chamber", *Stoch. Env. Res. Risk. A.* 21(1), pp.75–87.
- Kim, S.C., Friedrichs, C. T., Maa, J. P. Y., and Wright L. D. (2000). "Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic doppler velocimeter data." *J. Hydraul. Eng.* 126(6), pp.399–406.
- Kishore, G. R., and Dey, S. (2016). "Hydraulics of submerged offset-jets." 6th International Symposium on Hydraulic Structures. Portland, Oregon, USA, DOI:10.15142/T3550628160853
- Ko, N. W. M, and Lau, K. K (1989). "Flow structures in initial region of two interacting parallel plane jets", *Exp. Therm. Fluid. Sci.* 2(4), pp.431–449
- Levin, S. G., and Manion, F. M. (1962). "Jet attachment distance as a function of adjacent wall offset and angle." Technical report, Harry Diamond Laboratories, Army Materiel Command, Washington DC.
- Long, D., Steffler, P., and Rajaratnam, N. (1990). "LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump." *J. Hydraul. Res.*, 28(4), pp.437–460.
- Mianaei, S. and Keshavarzy, A.R. (2008) "Spatio-temporal variation of transition probability of bursting events over ripples at the bed of the open channel", *Stoch. Env. Res. Risk. A.* 22(2), pp.257–264.
- Nakagawa, H. and Nezu, I. (1997). "Predictions of the contributions to the Reynolds stress from bursting events in open-channel flows", *J. Fluid. Meherآیین م.، قدسیان م. و خسروی مشیزی م. (1395). بررسی تأثیر استغراق آبشکن بر پارامترهای آشفتگی در اطراف آبشکن مستقر در قوس 90°، نشریه عمران مدرس، دوره 16، شماره 2، صص. 257-243.*
- Agelin- Chaab, M. and Tachie, M.F. (2011). "Characteristics and structure of turbulent 3D offset jets." *Int. J. Heat Fluid. Fl.* 32(3), pp.608-620.
- Bey, A. Faruque, M.D. and Balachandar, R. (2007). "Two-Dimensional scour hole problem: role of fluid structures", *J. Hydraul. Eng.* 133(4), pp.414-431.
- Bhuiyan, F., Habibzadeh, A., Rajaratnam, N. and Zhu, D.Z., (2011). "Reattached turbulent submerged offset jets on rough beds with shallow tailwater." *J. Hydraul. Eng.* 137(12), pp.1636-1648.
- Biron, P.M., Robson, C., Lapointe, M.F., and Gaskin, S.J. (2004). "Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields." *Earth. Sutf. Proc. Land.* 29(11), pp.1403–1415.
- Bourque, C., and Newman, B. G. (1960). "Reattachment of a two-dimensional incompressible jet to an adjacent flat plate." *Aeronautical Quarterly*, 11(3), pp.201–232.
- Breusers, H.N.C and Raudkivi, A.J. (1991). "*Scouring: Hydraulic Structures Design Manual Series.*", Volume 2 van IAHR Design Manual, Taylor & Francis.
- Dey, D., and Eldho, T.I. (2009). "Effect of spacing of two offset jets on scouring phenomena." *J. Hydraul. Res.*, 47(1), pp.82-89.
- Dey, S, Nath, T. K and Bose, S. K. (2010). "Fully rough submerged plane wall-jets." *J. Hydro-Environment Res.* 4(4), pp.301-316.
- Dey, S. and Sarkar, A. (2008). "Characteristics of turbulent flow in submerged jumps on rough beds." *J. Eng. Mech.* 134 (1), pp.49-59.
- Drake T.G., Shreve R.L., Dietrich W.E., Whiting P.J. and Leopold LB (1988). "Bed load transport of fine gravel observed by motion picture photography", *J. Fluid. Mech.* 192, pp.193–217
- Duan, J.G. He, L. Wang, G.Q. and Fu, X.D. (2009). "Mean flow and turbulence around experimental spur dike." *Adv. Water. Resour.*, 32(12), pp.1717–1725.
- Goring, G. and Nikora, V.(2002). "Despiking acoustic doppler velocimeter data." *J. Hydraul. Eng.* 128(1), pp.117-126.

94(1), pp.95-112.

Sawyer, R. A. (1960). "The flow due to a two dimensional jet issuing parallel to a flat plate." J. Fluid. Mech. 9(4), pp.543-561.

Sawyer, R. A. (1963). "Two dimensional reattaching jet flows including the effect of curvature on entrainment." J. Fluid. Mech. 17(4), pp.481-498.

Soulsby, R. L. (1983). "The bottom boundary-layer in shelf seas." In Physical Oceanography of Coastal and Shelf Areas, Johns B (ed.). Elsevier: Amsterdam; 189-266.

Thorne, P. D., Williams, J. J., and Heathershaw A. D (1989). "In situ acoustic measurements of marine gravel threshold and transport", Sedimentology, 36, pp.61-74

Townsend, A. A. (1976). "The structure of turbulent shear flow." 2nd ed., Cambridge University Press, New York.

Wang, X. K., and Tan, S. K. (2007). "Experimental investigation of the interaction between a plane wall jet and a parallel offset jet." Exp. Fluids. 42(4), pp.551-562.

Wynanski, I., Katz, Y., and Horev, E. (1992). "On the applicability of various scaling laws to the turbulent wall jet", J. Fluid. Mech. 234, 669-690.

Yaeger M.A. (2009). "Mean flow and turbulence around two series of experimental dikes." MSc. thesis, University of Arizona, Department of Hydrology and Water Resources.

Yoon, S. H., Kim, K. C., Kim, D. S., and Chung, M. K. (1995). "Effect of surface roughness on a turbulent wall-attaching offset jet", Exp. Fluids. 19(1), pp.38-42.

Mech. 80(1), pp.99-128.

Nasr A. and Lai, J. C. S. (2000) "The effects of wall inclination angle on an inclined offset jet." Proceedings of 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal.

Nasr, A., and Lai, J. C. S. (1997) "Comparison of flow characteristics in the near field of two parallel plane jets and an offset plane jet", Phys. Fluids. 9(10), pp. 2919-2931.

Nelson J. M., Shreve R. L., Mclean S. R., and Drake T. G (1995). "Role of nearbed turbulence structure in bed load transport and bed form mechanics", Water. Resour. Res. 31(8), pp. 2071-2086.

Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). "Turbulence in open-channel flows." Balkema, Rotterdam, Netherlands.

Nychas S.G., Hershey H.C. and Brodkey R.S. (1973). "A visual study of turbulent shear flow." J. Fluid. Mech. 61, pp.513-540.

Pelfrey, J. R. R., and Liburdy, J. A. (1986). "Effect of curvature on the turbulence of a two-dimensional jet." Exp. Fluids. 4(3), pp.143-149.

Rajaratnam, N. (1965). "The hydraulic jump as a wall jet." J. Hydraul. Div. 91(5), 107-132.

Rajaratnam, N. (1976). "Turbulent jets." American Elsevier publication company, New York.

Rajaratnam, N. and Mazurek, K. (2003). "Erosion of sand by circular impinging water jets with small tailwater." J. Hydraul. Eng. 129(3), pp. 225-229.

Rajaratnam, N. and Subramanya, K. (1968). "Plane turbulent reattached wall jets." J. Hydraul. Div.