

## کاربرد آنالیز کوادرنانت به منظور تعیین سهم هر یک از رخدادهای ترکشی در پدیده آبشستگی اطراف پایه پل

سمیه سلطانی گردفرامری<sup>۱\*</sup>، حسین افضلی مهر<sup>۲</sup>، الهام فاضل نجف آبادی<sup>۳</sup>

۱- استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان

\* ssoltani@ardakan.ac.ir

**چکیده** - برای مقابله با پدیده مخرب آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل، باید عوامل ایجاد کننده آن را شناخت. دلیل اصلی ایجاد آبشستگی، تغییر الگوی جریان و ایجاد دو سیستم گردابی در اطراف پایه است که باعث تخریب بستر، ایجاد گردابها و آبشستگی و انتقال رسوب در اطراف پایهها می‌شود. مطالعات نشان داده که انتقال رسوب در نزدیک بستر، به میزان زیادی به چهار واقعه پدیده ترکشی<sup>۱</sup> مرتبط می‌باشد. آنالیز کوادرنانت روشی برای مطالعه این پدیده و ابزاری برای بررسی تنش های رینولدز ناشی از جریانهای آشفتگی می‌باشد. در این مطالعه سرعت جریان با استفاده از دستگاه سرعتسنج صوتی اندازه‌گیری شد و با استفاده از آنالیز کوادرنانت، سهم هر یک از رخدادهای چهارگانه پدیده ترکشی در چاله آبشستگی اطراف یک پایه استوانه ای در یک کانال آزمایشگاهی بررسی و تعیین گردید. نتایج نشان داد که رخداد غالب جریان رفت و برگشتی (Q4)، سپس جریان پس‌زنی (Q2)، بعد از آن جریان بیرونی (Q1) و به دنبال آن جریان درونی (Q3) در کل عمق جریان است، به جز در چند نقطه نزدیک سطح بستر و درون چاله آبشستگی که با افزایش عمق جریان سهم جریان پس‌زنی بیشتر و مهمتر از سهم جریان رفت و برگشتی می‌گردد. نکته دیگر، کاهش سهم جریان رفت و برگشتی و جریان پس‌زنی با دور شدن از سطح بستر و افزایش سهم رخدادهای ربع اول و سوم در تولید تنش رینولدز می‌باشد، بطوری که در نزدیک سطح آب سهم هر چهار رخداد تقریباً یکسان می‌شود. هم چنین مشخص شد که با دور شدن از پایه تغییری در سهم رخدادهای ترکشی ایجاد نمی‌شود.

**کلید واژگان:** آبشستگی، آنالیز کوادرنانت، تنش رینولدز، آشفتگی، پایه پل

### ۱- مقدمه

شده است؛ چرا که مهم‌ترین سازه‌های ساخته شده توسط بشر یعنی پل‌ها، به دلیل آبشستگی تخریب شده‌اند (Dey and Raikar, 2007). دو عامل اساسی باعث ایجاد دو سیستم گردابی در اطراف پایه می‌شود که عبارتند از برخورد آب به پایه پل و جدایی آب از پایه پل. هر کدام از این عوامل باعث اثرات تخریبی روی بستر شده و عامل اصلی ایجاد گردابها و آبشستگی در اطراف پایهها

واژه آبشستگی معمولاً به جای واژه عمومی فرسایش استفاده می‌شود تا فرسایش ناشی از حضور یک سازه در مسیر جریان آب را مشخص کند. در ۵۰ سال گذشته به پدیده آبشستگی در اطراف سازه‌های آبی توجه زیادی

1. Bursting

می‌باشد. عامل برخورد آب به پایه، طبق یک فرایند پیچیده به گرداب نعل اسبی تبدیل می‌شود. عامل جدایی آب از پایه باعث ایجاد گرداب برخاستگی می‌شود (Dey and Raikar, 2007).

(2002) Graf and Istiarto مؤلفه‌های سرعت متوسط را با استفاده از سرعت‌سنج صوتی<sup>۱</sup> اندازه‌گیری و تنش‌های رینولدز، شدت آشفتگی و تنش برشی بستر در هر دو طرف (بالادست و پایین‌دست) پایه پل استوانه‌ای در شرایط آب‌شستگی متعادل را محاسبه کردند. جزئیات ساختار ۳ بعدی جریان (سرعت، آشفتگی و تنش رینولدز) در یک حفره آب‌شستگی ایجاد شده توسط یک جت افقی، توسط Kurniawan and Altinakar (2002) بوسیله یک سرعت‌سنج صوتی در آزمایشگاه بررسی شد. Dey and Raikar (2007) آشفتگی گرداب‌های نعل اسبی ایجاد شده در حفره آب‌شستگی در مجاورت پایه‌های استوانه‌ای و مربعی را با استفاده از سرعت‌سنج صوتی اندازه‌گیری کردند. نتایج آنها چگونگی تغییر جریان و خصوصیات آشفتگی گرداب‌های نعل اسبی با توسعه گودال آب-شستگی را نشان داد. (2012) Kumar and Kothyari ساختار جریان سه بعدی اطراف پایه استوانه‌ای ساده و مرکب در یک حفره آب‌شستگی را بررسی و مطالعه کردند. (2013a) Soltani-Gerdefaramarzi et al. استفاده از جت به منظور کنترل آب‌شستگی اطراف پایه استوانه‌ای را پیشنهاد و ساختار جریان اطراف پایه را مطالعه کردند. آنالیز کوادرنانت<sup>۲</sup> اولین بار در سال ۱۹۷۳، توسط Lu and Willmarth (1973) برای مطالعه تنش رینولدز جریان آشفته مطرح شد. این روش به طور قابل توجهی باعث فهم ساختار جریان‌های منسجم<sup>۳</sup> شده است. آنالیز کوادرنانت عموماً به عنوان ابزاری برای بررسی تنش رینولدز ناشی از جریان‌های آشفته به کار برده شده است. از این آنالیز برای بررسی جریان‌های آشفته پوششی مانند پوشش گندم، پوشش ذرت، مدل‌های تونل بادی و مدل کانال آب استفاده شده است. (1995) Nelson et al., مطرح کردند که رخداد رفت و برگشتی<sup>۴</sup> تنها رخداد عامل حرکت بار

بستر نبوده و رویداد جریان بیرونی<sup>۵</sup> نیز در انتقال بار بستر موثر است. آنها نشان دادند وقتی که مقدار جریان بیرونی نسبت به سایر رخدادها افزایش یابد، میزان رسوب به مقدار زیاد افزایش یافته، اگرچه مقدار تنش برشی رینولدز کاهش می‌یابد. مطالعات انجام شده توسط Nelson et al., (1995) و Drake et al. (1988) نشان داد که انتقال رسوب در نزدیک بستر، به میزان زیادی به چهار واقعه پدیده ترکیبی (جریان رفت و برگشتی، جریان پس‌زنی<sup>۶</sup>، جریان بیرونی و درونی<sup>۷</sup>) مرتبط می‌باشد. همچنین Nezu and Nakagawa (1993) و Nakagawa and Nezu (1978) در بررسی جریان آشفته بیان کردند بر روی بستر زبر در کانال‌های روباز در واقعه ترکیبی انتقال مومنتم و آشفتگی جریان بیشتر شده و باعث حرکت ذرات رسوب از بستر و حرکت با جریان می‌شوند. (2009) Mazumder et al. برای تعیین تفاوت خصوصیات جریان آشفته بر دو نوع شکل بستر و نقش آنها در انتقال رسوب از روش کوادرنانت بهره بردند. (2010) Dey and Nath از آنالیز کوادرنانت برای کمی کردن تنش رینولدز در یک جریان تحت مکش و تزریق در یک بستر شنی استفاده کردند. (2010) Sarkar and Dey خصوصیات جریان آشفته بر روی یک بستر شنی را با استفاده از آنالیز کوادرنانت بررسی کردند. آنها نشان دادند که رخداد جریان رفت و برگشتی پدیده غالب در زیر لایه میانی می‌باشد. Afzalimehr et al. (2011) برای تعیین سهم هر کوادرنانت در ساختار جریان در یک کانال باز با پوشش گیاهی متراکم آنالیز کوادرنانت را بکار بردند و به این نتیجه رسیدند که در نزدیک بستر پوشیده شده با گیاه، پدیده جریان رفت و برگشتی و جریان پس‌زنی غالب بوده و با دور شدن از این ناحیه سهم رخداد جریان بیرونی افزایش می‌یابد. هدف از انجام این تحقیق، بهره بردن از آنالیز کوادرنانت به منظور تعیین سهم رخدادهای پدیده ترکیبی در ایجاد تنش‌های رینولدز و ارتباط آنها با پدیده انتقال رسوب در چاله آب‌شستگی در اطراف پایه پل می‌باشد.

5. Outward  
6. Ejection  
7. Inward

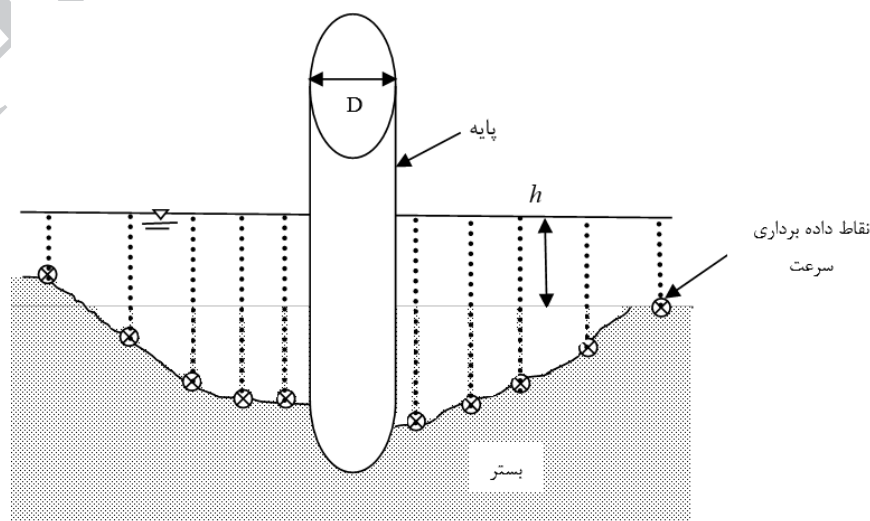
1. ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)  
2. Quadrant Analysis  
3. Coherent Structure  
4. Sweep

## ۲- مواد و روشها

### ۲-۱- شرایط کانال و آزمایشها

آزمایشها در یک کانال مستطیلی با کف افقی به طول ۳۰ متر، عرض ۰/۷ متر و ارتفاع ۰/۶ متر از جنس فایبر گلاس شفاف تحت شرایط آب زلال در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه نانیانگ سنگاپور انجام شد. دبی جریان ۵۳/۵ لیتر بر ثانیه، عمق و سرعت جریان به ترتیب ۲۸ سانتی متر و ۰/۲۷ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. قطر متوسط ذرات رسوب ۰/۴۸ میلی متر با انحراف معیار هندسی ۱/۳۳ بود که با توجه به کوچکتر بودن آن از ۱/۴، ذرات از توزیع یکنواختی بهره مند بودند. برای تعیین شرایط جریان در آستانه حرکت ذرات، از روش سعی و خطا و نمودار شیلدز استفاده شد. به این ترتیب که در ابتدا مقداری برای سرعت برشی بحرانی فرض می شود. سپس مقدار عدد رینولدز ذره محاسبه می شود و از روی نمودار شیلدز مقدار پارامتر شیلدز یا تنش برشی بدون بعد بدست می آید. در گام بعدی مقدار تنش برشی بدون بعد از نمودار شیلدز با مقدار محاسبه شده آن از فرمول، مقایسه شده و در صورتی که تفاوت این دو مقدار ناچیز باشد مقدار سرعت برشی بحرانی فرض شده در محاسبات بعدی برای محاسبه سرعت بحرانی ذرات استفاده می شود. در غیر این صورت این روند تکرار شده تا مقدار تنش برشی محاسبه شده و بدست آمده از نمودار شیلدز تقریباً مساوی شود. در این آزمایش مقدار سرعت برشی بحرانی ۰/۱۷، تنش برشی

بدون بعد  $0.32/u^*$  و سرعت برشی با فرض نسبت  $u^*/u_c^*$  برابر با ۰/۸، ۰/۱۷ متر بر ثانیه بدست آمد که البته این ارقام با داده های مشاهداتی ارزیابی گردید. محل انجام آزمایشها در کانال دارای طول ۹ متر، عرض ۷۰ سانتی متر و عمق ۲۰ سانتی متر بود که ابتدای آن به فاصله ۱۲ متر از مدخل کانال قرار داشت. سرعت جریان با استفاده از دستگاه سرعت سنج صوتی در یک چاله آبشستگی به عمق ۱۲/۵ سانتی متر اندازه گیری شد. آزمایشها حول پایه استوانه ای شکل به قطر ۷/۵ سانتی متر در محور مرکزی کانال انجام گردید. اندازه گیری سرعت بعد از ۴۸ ساعت از شروع آزمایش در ۵ نقطه در بالادست پایه  $(2/4D \leq x \leq 0.67D)$ ، قطر پایه) و ۵ نقطه در پایین دست پایه  $(-3/3D \leq x \leq -0.67D)$  شامل بیرون و درون حفره آبشستگی که در پایان آزمایش بوسیله چسب تثبیت شده بود، از نزدیک ترین نقطه ممکن به بستر تا سطح آب در مدت زمان ۱۲۰ ثانیه برای هر نقطه انجام شد. شکل ۱ حفره آبشستگی و نقاط داده برداری را نشان می دهد. آنالیز کوادرنات با استفاده از پارامتر نوسانات سرعت در سه جهت و با نوشتن یک برنامه کامپیوتری در نرم افزار متلب صورت گرفت. جزئیات و مشخصات کامل کانال، آزمایشها و تعیین عمق تعادل آبشستگی که در آزمایشهای جداگانه ۴۸ ساعت بدست آمد، در مقالات Soltani-Gerdefaramarzi et al. (2013b,c) و (2014) ذکر شده و در اینجا تکرار نمی شود.



شکل ۱ حفره آبشستگی و نقاط داده برداری سرعت

## ۲-۲- آنالیز کوادرنانت

به طور متعارف روش کوادرنانت شامل مطالعه رابطه بین نوسانات زمانی اجزای سرعت  $u'$  و  $v'$  (به ترتیب نوسان سرعت در راستای جریان و در راستای عمق جریان) و به ویژه رابطه آنها با سیستم مثلثاتی چهارگانه می‌باشد. آنالیز کوادرنانت سهم هر رخداد در تعیین تنش رینولدز را مشخص می‌کند و همبستگی این دو پارامتر حضور ساختار جریان‌های منسجم را تأیید می‌کند.

در این چهار کوادرنانت:

ربع اول: رویداد جریان بیرونی که در آن  $u' > 0$  و  $v' > 0$

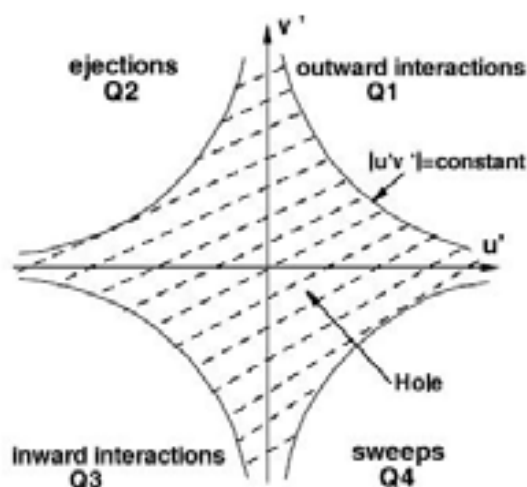
ربع دوم: رویداد جریان پس‌زنی که در آن  $u' < 0$  و  $v' > 0$

ربع سوم: رویداد جریان درونی که در آن  $u' < 0$  و  $v' < 0$

ربع چهارم: رویداد جریان رفت و برگشتی که در آن  $u' > 0$  و  $v' < 0$

سیکلی که شامل ۴ رویداد ذکر شده در بالا می‌باشد، پدیده ترکشی یا انفجاری نامیده می‌شود. خصوصیات این رخداد با استفاده از خصوصیات آماری نوسانات سرعت ( $u'$  و  $v'$ ) توصیف می‌شود. برای این کار اجزای نوسانات سرعت ( $u'$  و  $v'$ ) در مقابل یکدیگر ترسیم می‌شوند و صفحه چهارگانه کوادرنانت را تشکیل می‌دهند. در شکل (۱) چهار نوع واقعه ترکشی و نوسانات مؤلفه‌های سرعت در چهار ربع سیستم مختصات نشان داده شده است. حرکت در جهت جریان اندازه حرکت زیاد سیال و حرکت در خلاف جهت جریان اندازه حرکت کم سیال را نشان می‌دهد. رخداد جریان پس-

زنی حرکت سیال با سرعت کم از دیواره‌ها و رخداد جریان رفت و برگشتی حرکت سیال با سرعت زیاد به سمت دیواره‌ها را توصیف می‌کند. برای متمایز کردن عامل بزرگتر ایجاد کننده  $-u'v'$  در هر کوادرنانت و خارج کردن  $u'$  و  $v'$  با افزایش زمان نمونه‌برداری، پارامتری به نام  $H$  تعریف می‌شود. ناحیه هایپربولیک هاشور خورده در شکل ۲ ناحیه هول<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و به وسیله منحنی  $|u'v'| = \text{constant}$  بیان می‌شود.



شکل ۲ چهار نوع واقعه ترکشی و خصوصیات نوسانات سرعت (Lu and Willmarth, 1973)

اندازه هول یا  $H$  با رابطه (۱) توصیف می‌شود که در آن  $u'$  و  $v'$  به ترتیب نوسانات سرعت در جهت جریان و در جهت عمود بر جریان و  $(u'u')^{0.5}$  و  $(v'v')^{0.5}$  به ترتیب میانگین مجذور مربعات سرعت در جهت جریان و در جهت عمود بر جریان می‌باشد (افضلی مهر و همکاران، ۲۰۱۱).

$$H = \frac{|u'v'|}{(u'u')^{0.5}(v'v')^{0.5}} \quad (1)$$

مقدار  $H = 0$  نشان می‌دهد که منحنی تمام مقادیر  $u'$  و  $v'$  را در بر گرفته است. با افزایش مقدار  $H$ ، رخداد های ضعیف حذف و رخداد های قوی باقی می‌مانند. سهم  $-u'v'$  از هر چهار ناحیه کوادرنانت از رابطه (۲) قابل محاسبه است (افضلی مهر و همکاران، ۲۰۱۱):

$$\lambda_{i,H}(y,t) = \begin{cases} 1 & \text{if } (u', v') \text{ is in quadrant } i \\ & \text{and if } |u'v'| \geq H(u'u')^{0.5}(v'v')^{0.5} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

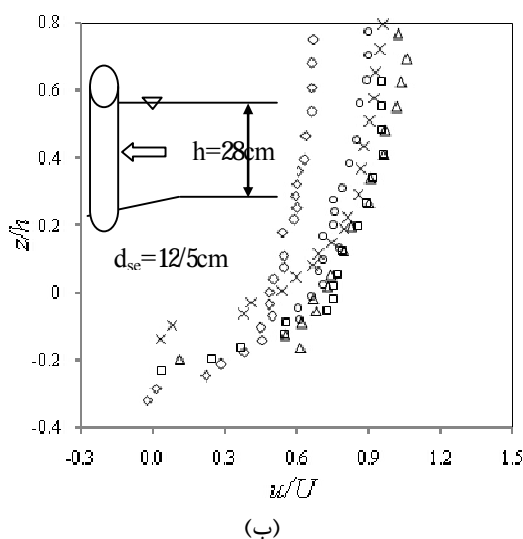
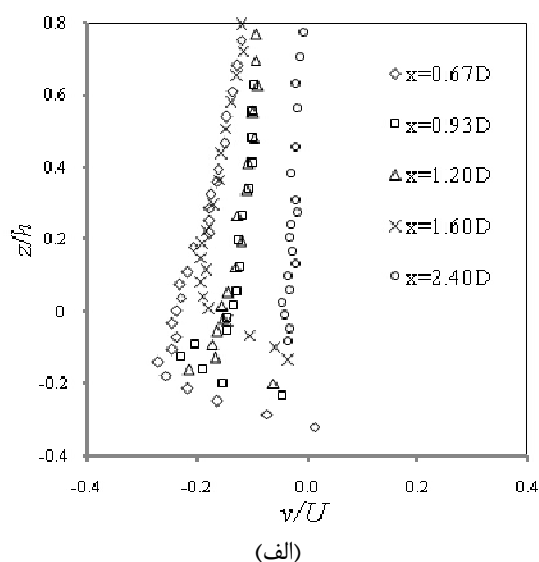
در یک نقطه، سهم  $-u'v'$  از کوادرنانت  $i$  ام در خارج از ناحیه هول با اندازه  $H$  از رابطه (۳) قابل محاسبه است (افضلی مهر و همکاران، ۲۰۱۱):

$$\langle u'v' \rangle_{i,H} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'(t)v'(t) \lambda_{i,H}(y,t) dt \quad (3)$$

سهم  $-u'v'$  از هر رخداد،  $S_{i,H}$ ، از رابطه (۴) به دست

1. Hole

می‌آید (افضلی مهر و همکاران، ۲۰۱۱):  
 گردید. این مؤلفه سرعت در بالادست پایه نشان دهنده قدرت و نقش جریان رو به پایین در فرایند آب‌شستگی و انتقال رسوب در این ناحیه می‌باشد.



شکل ۳ پروفیل‌های سرعت در بالادست پایه الف- در راستای قائم و ب- در جهت جریان

در پشت پایه و نزدیک آن، سرعت طولی جریان کوچک و منفی است که نشان دهنده برگشت جریان به سمت سطح آب است. این مؤلفه سرعت از سطح آب به سمت سطح

$$S_{i,H} = \frac{\langle u'v' \rangle_{i,H}}{u'v'} \quad (4)$$

برای ربع‌های دوم و چهارم،  $S_{i,H} > 0$  و برای ربع‌های اول و سوم  $S_{i,H} < 0$  می‌باشد. بنابراین برای  $H=0$  در یک نقطه مجموع سهم هر یک از رخدادها برابر با یک است و آن به صورت رابطه (۵) است (افضلی مهر و همکاران، ۲۰۱۱):

$$\sum_{i=0}^{i=A} [S_{i,H}]_{H=0} = 1 \quad (5)$$

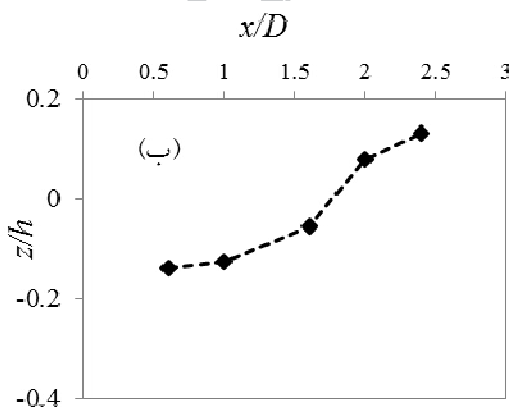
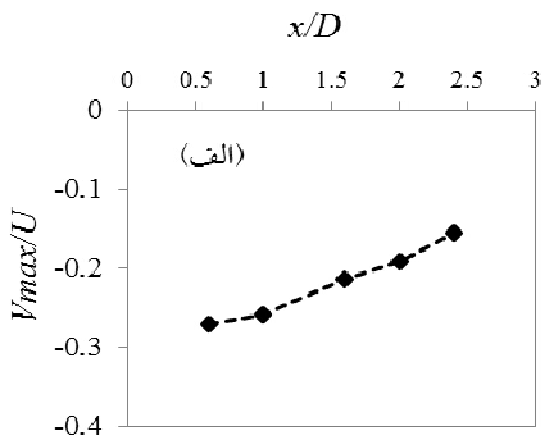
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- پروفیل‌های سرعت

شکل ۳ توزیع سرعت در جهت جریان،  $u(z)$  و سرعت عمودی،  $v(z)$  در محور مرکزی کانال در بالادست پایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، در بالادست پایه، سرعت طولی جریان با فاصله گرفتن از سطح آب کاهش می‌یابد و در داخل حفره آب‌شستگی، ( $z < 0$ ) مخصوصاً در نزدیک بستر به مقدار منفی می‌رسد (شکل ۳- الف). علاوه بر آن مقادیر منفی سرعت طولی به سمت کف حفره آب‌شستگی افزایش می‌یابد، در حالی که با دور شدن از پایه، ( $x = 0.67D$  به  $x = 2.4D$ ) مقادیر مثبت سرعت افزایش یافته و نزدیک سطح آب به حداکثر می‌رسد. نزدیک‌ترین محل به پایه ( $x = 0.67D$ ) بیشترین مقدار سرعت منفی ( $-0.16 \text{ cm/s}$ ) درون حفره آب‌شستگی را نشان می‌دهد. این مقادیر منفی سرعت درون حفره آب‌شستگی، نشان دهنده جدایی جریان و حضور سیستم گردابی در این ناحیه است. نتایج این قسمت از آزمایش‌ها کاملاً با نتایج (Ahmed and Dey at al. (1995), Rajaratnam (1998), Tang, Graf and Istiarto (2002), et al. (2009) مطابقت دارد. در بالادست پایه، سرعت عمودی جریان مشخصاً دارای مقادیر منفی و نشان دهنده وجود جریان رو به پایین در این ناحیه می‌باشد (شکل ۳- ب). از سوی دیگر بیشترین مقادیر منفی سرعت عمودی جریان ( $v = -7/39 \text{ cm/s}$ ) در درون حفره آب‌شستگی

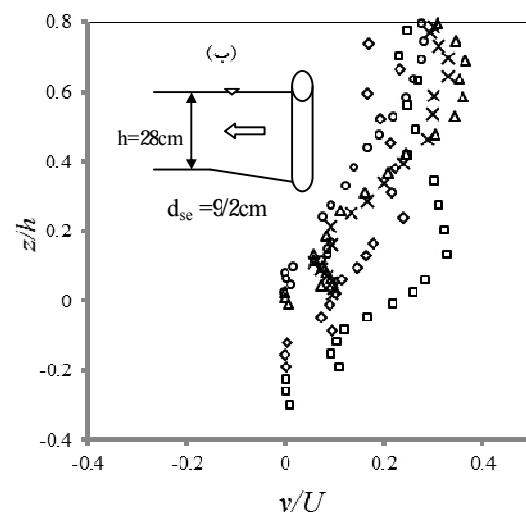
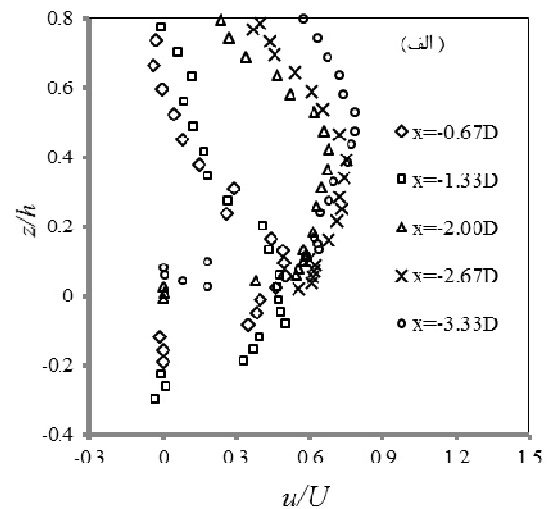
۲-۳- خصوصیات حداکثر جریان رو به پایین

شکل ۵- الف حداکثر مقدار جریان رو به پایین ( $V_{max}$ ) و محل آن،  $z/h$  را به عنوان تابعی از نسبت فاصله از بالادست مرکز پایه به قطر پایه ( $x/D$ ) نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، با فاصله گرفتن از پایه مقدار  $V_{max}$  به صورت تقریباً خطی افزایش می‌یابد. قدرمطلق بیشترین مقدار اندازه گرفته شده آن ( $\approx 0.17U$ ) در  $x = 0.67D$  و کمترین مقدار آن هنگامی است که  $x = 2.4D$  و  $V_{max}/U$  تقریباً به مقدار  $0.15$  می‌رسد. شکل ۵- ب نشان می‌دهد که محل حداکثر مقدار جریان رو به پایین ثابت نیست و حداکثر مقدار جریان رو به پایین، نزدیک سطح بستر و نزدیک به پایه اتفاق می‌افتد و با دور شدن از پایه، محل آن به بالای سطح بستر منتقل می‌شود.



شکل ۵ حداکثر مقدار جریان رو به پایین و موقعیت آن در بالادست پایه (جریان از راست به چپ)

بستر افزایش یافته و مقادیر مثبتی را کسب می‌کند اما درون حفره آب‌شستگی مقدار آن کاهش می‌یابد (شکل ۴- الف) که بیان کننده وجود سیستم‌های گردابی است که در ناحیه نزدیک سطح آب به دلیل جدائی جریان از لبه پایه بوجود آمده و به نام گرداب‌های برخاستگی شهرت دارد. مؤلفه سرعت عمودی در پشت پایه همیشه مثبت است و حداکثر مقدار آن همواره در زیر سطح آب قرار می‌گیرد (شکل ۴- ب). مقادیر مثبت این مؤلفه از سرعت، کنده شدن ذرات بستر و انتقال آنها را به پایین دست پایه و در پشت آن اثبات می‌کند، به طوری که در طول آزمایش این پدیده به وضوح با چشم قابل مشاهده بود.



شکل ۴ پروفیل‌های سرعت در پایین دست پایه الف- در جهت جریان و ب- در راستای قائم

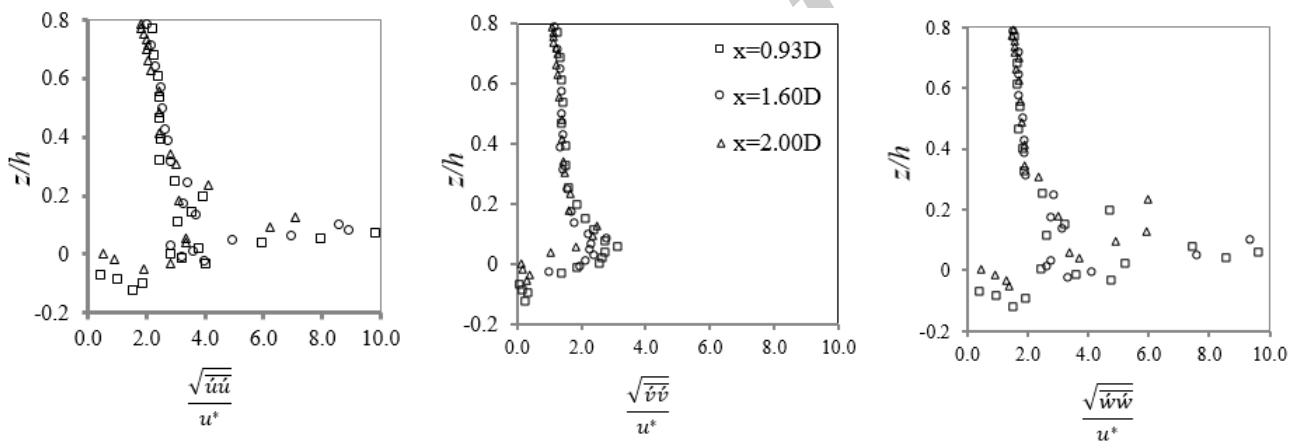
**۳-۳- توزیع شدت‌های آشفتگی در بالادست پایه**  
 شکل ۶ توزیع شدت آشفتگی در بالادست پایه را نشان می‌دهد. داده‌های این شکل‌ها توسط سرعت برشی،  $u^*$  و عمق جریان،  $h$  بدون بعد شده‌اند.

دلیل اختلاط آشفتگی جریان در این ناحیه دارای پراکندگی زیادی می‌باشد. (Graf and Istiarto (2002) و Dey and Raikar (2007) هم چنین مقادیر بالای تنش رینولدز درون حفره آب‌شستگی را گزارش کرده‌اند.

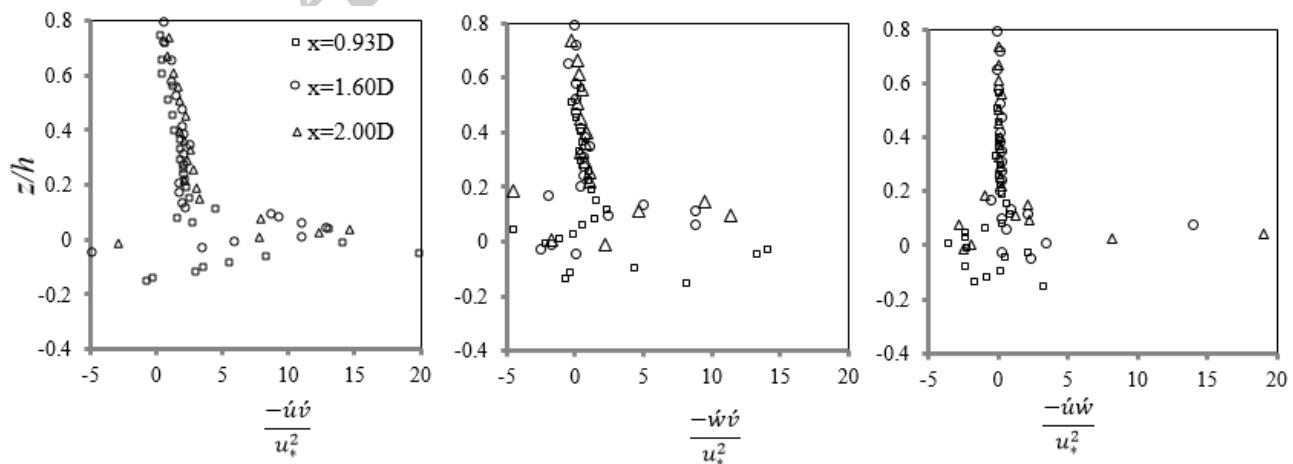
**۳-۴- توزیع تنش رینولدز در بالادست پایه**  
 شکل ۷ توزیع تنش‌های رینولدز در سه جهت در بالادست پایه را ارائه می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که در قسمت بالا و نزدیک به سطح آب تا  $z/h=0.2$  توزیع  $-u'v'$  خطی بوده و دارای مقادیر کوچکی است. همچنین مشاهده می‌شود که گرادیان‌های تنش در این فاصله بسیار اندک بوده‌اند. در مقابل مقدار و گرادیان تنش در ناحیه پایین‌تر ( $z < 0$ ) با حرکت به سمت پایین دست و پایین پایه، مقدار تنش رینولدز مخصوصاً درون حفره آب‌شستگی به

**۳-۵- آنالیز کوادرنانت**

آنالیز کوادرنانت به منظور کمی کردن توزیع تنش رینولدز که به وسیله ساختارهای به هم چسبیده آشفتگی در طول لایه مرزی آشفته تشکیل می‌شود، استفاده می‌شود. آنالیز کوادرنانت سهم هر رخداد در تعیین تنش رینولدز را مشخص و حضور ساختار جریان‌های منسجم را تأیید می‌کند. به طور کلی نوسانات سرعت در چهار کوادرنانت قرار می‌گیرد.



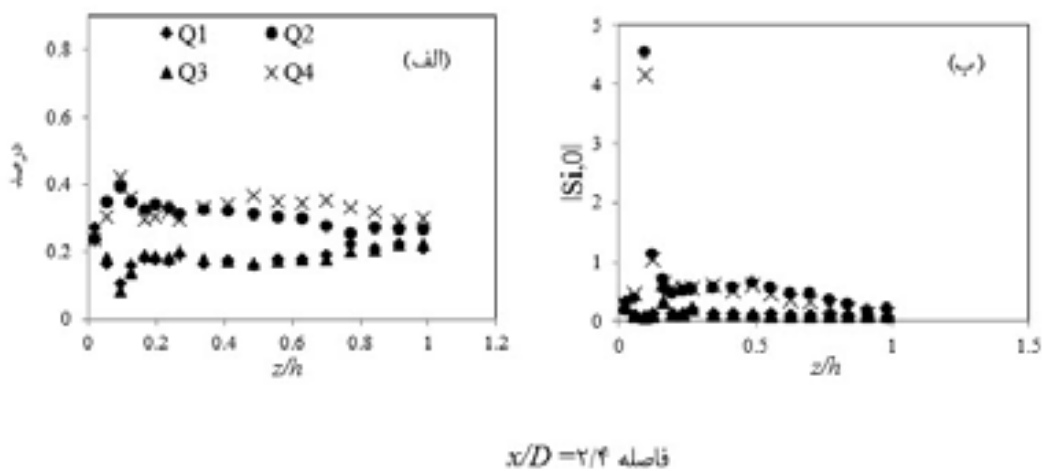
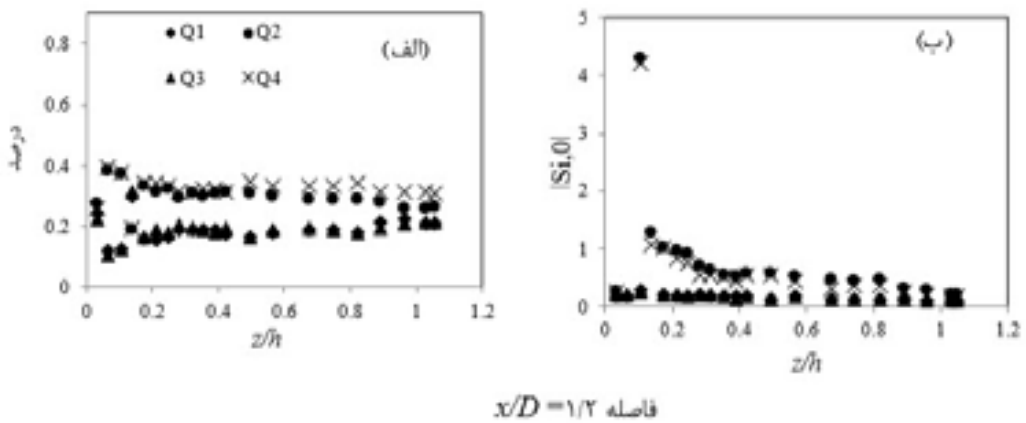
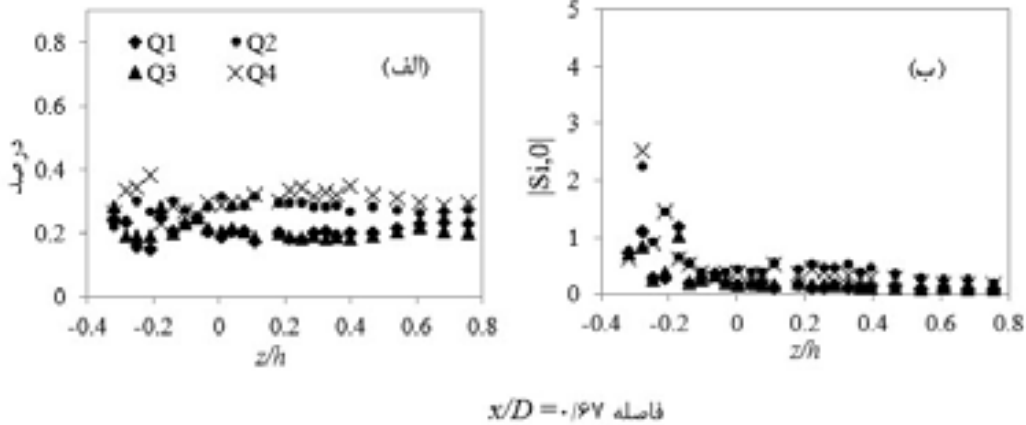
شکل ۶ توزیع شدت‌های آشفتگی در بالادست پایه



شکل ۷ توزیع تنش‌های رینولدز در سه جهت در بالادست پایه

شود؛ و در آخرین ربع،  $(i = 4)$   $u' > 0$  و  $v' < 0$  رویداد غالب حرکت جارویی است. ستون اول شکل ۸ درصد نوسانات سرعت در هر نقطه از عمق جریان در فاصله  $x/D = 0.67$  و  $1/2$  و  $2/4$  در بالادست پایه را نشان می‌دهد.

در ربع اول،  $(i = 1)$   $u' > 0$  و  $v' > 0$  رخداد غالب حرکت برون‌رفت است. در ربع دوم،  $(i = 2)$   $u' < 0$  و  $v' > 0$  و حرکت جرقه غالب است. در ربع سوم،  $(i = 3)$   $u' < 0$  و  $v' < 0$  و حرکت درون‌رفت رخداد غالب این ربع در نظر گرفته می‌شود.

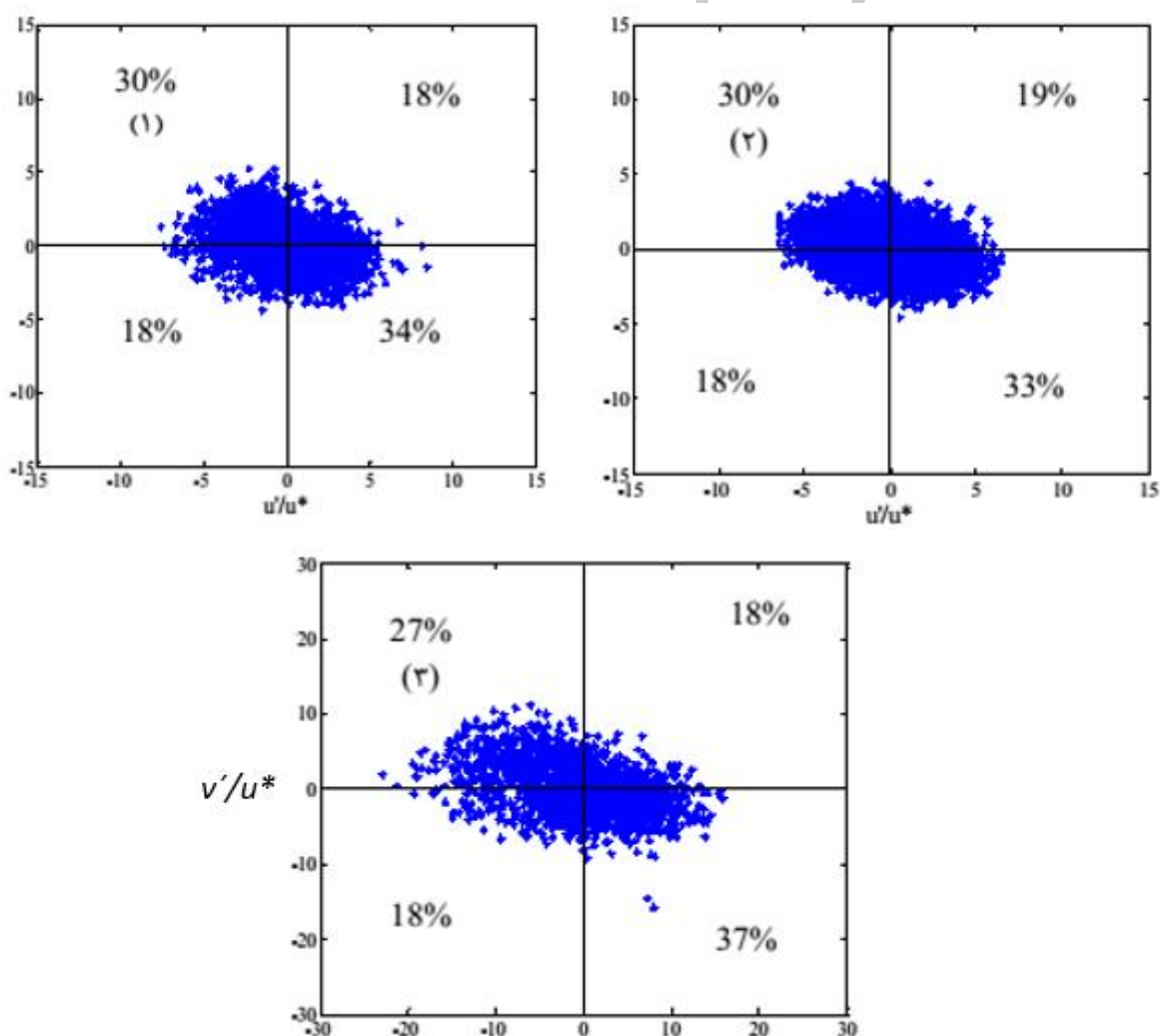


شکل ۸ درصد نوسانات سرعت و سهم جداگانه هر یک از رخدادها در تولید تنش رینولدز در هر نقطه از عمق جریان در فاصله  $(1) x/D = 0.67$   $(2) x/D = 1/2$  و  $(3) x/D = 2/4$  در بالادست پایه



عنوان  $S_{i,H}$  تعریف می‌شود. جایی که  $S_{i,H} > 0$  در ربع اول و سوم و  $S_{i,H} < 0$  در ربع دوم و چهارم قرار می‌گیرد. به منظور مطالعه سهم هر یک از رخدادها در تولید تنش رینولدز در بالادست پایه، ستون دوم شکل ۸ ترسیم شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در ناحیه  $z/h > 0.2$  مقدار رخدادهای جارویی، جرقه، درون‌رفت و برون‌رفت در فواصل مختلف از پایه رفتار یکسان دارند. هر چند درون حفره آب‌شستگی و خارج آن برای  $z/h < 0.2$  مقدار  $S_{i,H}$  افزایش می‌یابد. شکل ۹ درصد هر یک از رخدادها را در چهار ربع برای  $z/h = 0.2$ ،  $1/4$  و  $1/2$ ،  $x/D = 0.67$  در مرکز کانال نشان می‌دهد.

همان طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند، حرکت غالب جارویی (Q4)، سپس جرقه (Q2)، بعد از آن برون‌رفت (Q1) و به دنبال درون‌رفت (Q3) در کل عمق جریان است. تفاوت بین رخدادهای جرقه و جارویی به افزایش اندازه پیچک‌ها در فاصله عمودی از سطح بستر بر می‌گردد. نکته دیگری که از این شکل مشخص است، کاهش سهم سویپ و اجکشن با دور شدن از سطح بستر و افزایش سهم رخدادهای ربع اول و سوم می‌باشد، بطوری که در نزدیک سطح آب سهم هر چهار رخداد تقریباً یکسان می‌شود. هم چنین اثر افزایش فاصله از پایه بر رخدادهای غالب در آنالیز کوادرنانت درون حفره آب-شستگی برای  $z/h < 0.15$  قابل مشاهده می‌باشد. سهم جداگانه هر یک از این رخدادها در تولید تنش رینولدز، به



شکل ۹ درصد هر یک از رخدادها را در چهار ربع برای  $z/h = 0.2$ ،  $1/4$  و  $1/2$ ،  $x/D = 0.67$  در مرکز کانال

حفره آبشستگی که با افزایش عمق جریان سهم جرعه بیشتر و مهمتر از جارویی می‌گردد.

۵- با دور شدن از سطح بستر و نزدیک سطح آب کاهش سهم رخدادهای جارویی و جرعه و افزایش سهم رخدادهای درون‌رفت و برون‌رفت مشاهده می‌شود و تأیید کننده این نکته است که پدیده انتقال رسوب بیشتر در نزدیک سطح بستر اتفاق می‌افتد. همچنین کاربرد آنالیز کوادرنانت در سه ناحیه در جلو پایه نشان داد که با دور شدن از پایه تغییر چندانی در سهم رخدادهای پدیده انفجار وجود ندارد. به این معنی که در هر سه ناحیه در نزدیک بستر پدیده غالب جارویی و جرعه می‌باشد.

#### ۵- فهرست علائم

$D$	قطر پایه (m)
$dse$	عمق آبشستگی متعادل (m)
$h$	عمق جریان (m)
$U$	سرعت متوسط جریان ( $ms^{-1}$ )
$u, w, v$	مؤلفه‌های سرعت جریان به ترتیب در جهت $x, y$ و $z$ ( $ms^{-1}$ )
$u', w', v'$	مؤلفه‌های نوسانات سرعت جریان به ترتیب در جهت $x, y$ و $z$ ( $ms^{-1}$ )
$u^*$	سرعت برشی ( $ms^{-1}$ )
$u^*_c$	سرعت برشی بحرانی جریان ( $ms^{-1}$ )
$V_{max}$	حداکثر مقدار جریان رو به پایین ( $ms^{-1}$ )
$x$	فاصله افقی از مرکز پایه (m)
$z$	فاصله از بستر (m)

#### ۶- منابع

سلطانی گردفرامری، س. (۱۳۹۱). "کنترل و کاهش آب-شستگی موضعی پایه پل با استفاده از جت." رساله دکتری علوم و مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

Afzalimehr, H., R. Moghbel, J. Gallichand and J. Sui. (2011). "Investigation of turbulence characteristics in channel with dense vegetation". Int. J. Sediment Res. 26(3): 269-282.

Ahmed, F. and N. Rajaratnam. (1998). "Flow

همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، شکل نمودارها در چهار ربع، شکلی بیضی شکل با کشیدگی در ربع دوم و چهارم را نشان می‌دهد. هم چنین سهم رخداد جرعه و درون‌رفت در کل عمق جریان بیشتر از سایر رویدادها است و سهم برون‌رفت و جارویی کمتر از سایر رویدادهای مؤثر در تولید تنش رینولدز می‌باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

طبق مطالعات انجام شده، انتقال رسوب در نزدیک بستر به میزان زیادی به چهار واقعه پدیده ترکشی یا انفجاری مرتبط است. در این مقاله سعی شده تا از تکنیک آنالیز کوادرنانت به منظور کمی کردن توزیع تنش‌های رینولدز در پدیده انفجاری در حفره آبشستگی اطراف پایه پل استفاده گردد. آنالیز کوادرنانت سهم هر رخداد این پدیده را در تعیین تنش رینولدز مشخص و حضور ساختار جریان‌های منسجم یا چرخابه را تأیید می‌کند. به طور خلاصه می‌توان به نکات زیر از نتایج این مطالعه اشاره کرد:

۱- توزیع سرعت‌های عمودی در جلو پایه نشان داد که سرعت عمودی جریان مشخصاً دارای مقادیر منفی است که نشان دهنده وجود جریان روبه پایین در این ناحیه است. همچنین بیشترین مقادیر منفی سرعت عمودی جریان درون حفره آبشستگی و نزدیک به پایه است. این مؤلفه سرعت نشان دهنده قدرت و نقش جریان رو به پایین در فرایند آبشستگی و تشکیل حفره و انتقال رسوب در این ناحیه می‌باشد.

۲- توزیع سرعت در پشت پایه نشان داد که در پشت پایه و نزدیک آن سرعت طولی جریان کوچک و منفی است که دلیل آن برگشت جریان به سمت سطح آب و وجود سیستم‌های گردابی به نام گرداب‌های برخاستگی است.

۳- خصوصیات حداکثر جریان رو به پایین نشان داد که محل حداکثر جریان رو به پایین ثابت نیست و نزدیک سطح بستر و نزدیک پایه می‌باشد و با دور شدن از پایه، محل آن به بالای سطح بستر منتقل می‌شود.

۴- نتایج آنالیز کوادرنانت نشان داد که رخداد غالب پدیده ترکشی در حفره آبشستگی، حرکت جارویی، سپس جرعه و به دنبال آن برون‌رفت و درون‌رفت در کل عمق جریان است، به جز در چند نقطه نزدیک سطح بستر و درون

- isolated scalene and isosceles triangular-shaped bedforms". J. Hyd. Res. 47(5): 626-37.
- Nakagawa, H. and I. Nezu. (1978). "Bursting phenomenon near the wall in open channel flow and its simple mathematical model". Faculty of Engineering, Kyoto University, Japan, XL. 40(4): 213-40.
- Nelson, J. M., R. L. Shreve, S. R. Mclean and T. G. Drake. (1995). "Role of near-bed turbulence structure in bed-load transport and bed form mechanics". Water Resour. Res. 31(8): 2071-2086.
- Nezu, I. and H. Nakagawa. (1993). *Turbulence in open channel flows*. Balkema, Rotterdam: IAHR Monograph.
- Sarkar, S. and S. Dey. (2010). "Double-averaging turbulence characteristics in flows over a gravel bed". J. Hyd. Res. 48(6): 801-809.
- Soltani-Gerdefaramarzi, S., Afzalimehr, H., Chiew, Y.M. and Lai, J.S. (2013a). "Jets to control scour around circular bridge piers". Canadian Journal of Civil Engineering. 40:204-212.
- Soltani-Gerdefaramarzi, S., Afzalimehr, H. Chiew, Y.M., and Ghasemi, M. (2013b). "Turbulent characteristics in flow subjected to bed suction and jet injection as a pier scour countermeasure". Journal of Hydraulic Structure. 1(1):1-9.
- Soltani-Gerdefaramarzi, S., Afzalimehr, H., Chiew, Y.M. and Gallichand, J. (2014). "Reduction of pier scour using bed suction and jet injection". Water Management. 167(WM2):167-114.
- Tang, H. W., B. Ding, Y. M. Chiew and S. L. Fang. (2009). "Protection of bridge piers against scouring with tetrahedral frames". Int. J. Sediment Res. 24(4): 385-399.
- around bridge piers". J. Hyd. Eng. 124(3): 288-300.
- Dey, S., S. Bose and G. L. N. Sastry. (1995). "Clear water scour at circular piers: a model". J. Hyd. Eng. 121(12): 869-876.
- Dey, S. and R. V. Raikar. (2007). "Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers". J. Hyd. Eng. 133(4): 399-413.
- Dey S. and T. Nath. (2010). "Turbulence characteristics in flows subjected to boundary injection and suction". J. Eng. Mech. 136(7): 877-888.
- Drake T. G., R. L. Shreve, W. Dietrich, P. J. Whiting and L. B. Leopold. (1988). "Bed-load transport of fine gravel observed by motion-picture photography". J. Fluid Mech. 192: 193-217.
- Graf, W. H. and I. Istiarto. (2002). "Flow pattern in the scour hole around a cylinder". J. Hyd. Res. 40(1): 13-19.
- Kumar, A. and U. C. Kothiyari. (2012). "Three-dimensional flow characteristics within the scour hole around circular uniform and compound piers". J. Hyd. Eng. 138(5): 420-429.
- Kurniawan, A. and M. S. Altinakar. (2002). "Velocity and turbulence measurements in a scour hole using an Acoustic Doppler Velocity Profiler. Third International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering", EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Lu, S. S. and W. W. Willmarth. (1973). "Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer". J. Fluid Mech. 60: 481-511.
- Mazumder B. S., D. K. Pal, K. Ghoshal and S. P. Ojha. (2009). "Turbulence statistics of flow over