

# بررسی ساختار جریان آشفته اطراف آبشکن تیغی قرارگرفته در موقعیت‌های مختلف قوس $90^\circ$

مجتبی مهرآیین\* (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی

مسعود قدسیان (استاد)

پژوهشکده مهندسی آب و دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

سید محمد امین نجیبی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۷ (دوره ۲ - ۳۴، شماره ۲/۱، ص. ۱۳-۲۲)

در نوشتار حاضر، مشخصات میدان جریان اطراف آبشکن تیغی قرارگرفته در قوس  $90^\circ$  اندازه‌گیری و با توجه به میزان آبشستگی ایجادشده در اطراف آبشکن‌های مذکور که از مطالعات پیشین به دست آمده‌اند، ارتباط میان آبشستگی و میدان جریان اطراف آبشکن‌های تیغی قرارگرفته در قوس  $90^\circ$  بررسی شده است. نتایج به دست آمده، وجود جریان ثانویه در قوس، گردابه‌ی نعل اسبی در اطراف آبشکن و ناحیه‌ی جریان برگشتی با سرعت کم را تأیید کرد. همچنین نتایج نشان داد تنش‌های برشی وارد بر بستر که از طریق تنش‌های رینولدز و نوسان‌های مؤلفه‌های سرعت به دست آمده‌اند، برای تعیین نقاط مستعد آبشستگی مناسب نیستند و وجود پیک‌هایی در طیف توانی آشفتگی در نواحی نزدیک آبشکن، نشان دهنده‌ی توانایی جریان برای انتقال رسوبات از نواحی مذکور است. علاوه بر این، سهم پدیده‌ی بیرون‌رانی در تنش‌های رینولدز در نواحی نزدیک به نوک آبشکن بیشتر بوده است که می‌تواند عامل اصلی انتقال رسوبات از نواحی نزدیک به نوک آبشکن در مراحل ابتدای آبشستگی به صورت بار معلق باشد.

واژگان کلیدی: میدان جریان، آبشکن تیغی، قوس تند، پارامترهای آشفتگی.

## ۱. مقدمه

استفاده از آبشکن‌ها، یکی از روش‌های متداول در ساماندهی رودخانه‌هاست. آبشکن‌ها بیشتر در قوس رودخانه‌ها کاربرد دارند و با دورکردن جریان نزدیک‌شونده به ساحل و افزایش سرعت جریان در ناحیه‌ی تنگ‌شدگی، موجب کاهش ته‌نشینی رسوبات در ساحل مقابل می‌شوند. مطالعات متعددی در مورد تعیین ابعاد حفره‌ی آبشستگی اطراف آبشکن انجام شده است که بیشتر آن‌ها در مورد تعیین ابعاد چاله‌ی آبشستگی اطراف آبشکن‌های قرارگرفته در مسیر مستقیم است.<sup>[۱-۴]</sup> مجموعه‌ی مطالعات نیز در مورد تعیین ابعاد چاله‌ی آبشستگی در اطراف آبشکن‌های قرارگرفته در قوس  $90^\circ$  انجام شده است.<sup>[۵-۸]</sup> از آنجایی که در بیشتر موارد، بیشترین میزان عمق آبشستگی در اطراف آبشکن اول از سری آبشکن‌ها ایجاد می‌شود،<sup>[۴]</sup> لذا بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی آبشستگی و میدان جریان اطراف آبشکن‌ها در اطراف تک آبشکن که به عنوان آبشکن اول در سری آبشکن‌هاست، انجام شده است،<sup>[۵-۸]</sup> و نتایج آن‌ها نشان دهنده‌ی افزایش ابعاد

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۰/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۳/۱۵، پذیرش ۱۳۹۵/۱۰/۴.

DOI: 10.24200/J30.2018.1348

mehraein@khu.ac.ir  
ghods@modares.ac.ir  
aminnajibi@gmail.com

چاله‌ی آبشستگی شکل‌گرفته در اطراف آبشکن‌ها با افزایش عدد فرود جریان نزدیک‌شونده، افزایش طول آبشکن و افزایش زاویه‌ی قرارگیری آبشکن نسبت به ابتدای قوس توسعه‌یافته است، اما ابعاد چاله‌ی آبشستگی با افزایش درصد استغراق آبشکن کاهش می‌یابد.

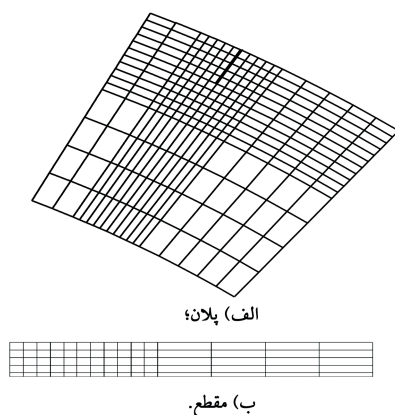
پژوهش‌های متعددی در مورد میدان جریان اطراف آبشکن‌های تیغی و T شکل نیز انجام شده است که تأکید آن‌ها بر میدان جریان میانگین اطراف آبشکن‌های ذکرشده و ارتباط آن با فرایند آبشستگی است،<sup>[۹،۸]</sup> و نتایج آن‌ها نشان‌دهنده‌ی وجود جریان ثانویه‌ی اصلی و جریان ثانویه‌ی کوچک شکل‌گرفته در نزدیک تراز سطح آب و نیز تشکیل گردابه‌ی نعل اسبی در نزدیک نوک آبشکن است که به عنوان عامل اصلی در فرایند آبشستگی معرفی شده است. انحراف مسیر بیشینه‌ی سرعت مشاهده‌شده در عرض مقاطع مختلف از سمت ساحل داخلی به ساحل خارجی از نتایج دیگر مطالعات مذکور است. برخی پژوهشگران،<sup>[۱۰،۱۱]</sup> پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی را به عنوان پدیده‌های مهم و تأثیرگذار در آبشستگی معرفی کرده‌اند و نتایج پژوهشی در سال ۱۹۹۵،<sup>[۱۲]</sup> نشان داد که پدیده‌های اندرکنشی، سهم اصلی را در انتقال رسوب در مناطق با جریان چرخشی دارند. همچنین در برخی مطالعات

جدول ۱. شرایط مربوط به انجام آزمایش‌ها.

نوع آب‌شکن	$\alpha^\circ$	$l$ (cm)	$Y$ (cm)	$u_c$ $\frac{m}{s}$	$u$ $\frac{m}{s}$	دبی جریان $\frac{lit}{s}$	قطر متوسط مصالح	انحراف معیار مصالح	تعداد آزمایش‌ها
تیغی	$30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$	۹	۰/۱۱۸	۰/۳۵۶	۰/۳۵	۲۴/۷	۱/۲۸ mm	۱/۳	۳

کانال بالادست، قوس  $90^\circ$  و کانال مستقیم پایین دست تشکیل شده بود. طول کانال بالادست و پایین دست به ترتیب ۷/۱ و ۵/۲ (m) بود که توسط قوس  $90^\circ$  با شعاع مرکزی ۱/۲ (m) به یکدیگر مرتبط شدند. با توجه به شعاع انحناء قوس و عرض کانال قوس مورد استفاده در پژوهش حاضر، قوس مذکور جزء قوس‌های تند محسوب می‌شود.<sup>[۲۵]</sup> در انتهای کانال، دریچه‌ی پروانه‌ی برای تنظیم سطح آب قرار گرفت و در ابتدای کانال، مخزنی برای آرام‌سازی جریان ورودی به کانال به ابتدای کانال مستقیم بالادست متصل شد. برای اندازه‌گیری عمق آب درون کانال از عمق‌سنج دیجیتالی با دقت (mm) ۰/۱ استفاده و دبی جریان نیز با استفاده از اریفیس<sup>۱</sup> کالیبره‌شده اندازه‌گیری شد. شرایط انجام آزمایش‌ها در جدول ۱ به صورت خلاصه ارائه شده است که در آن  $u$ : سرعت متوسط جریان در کانال مستقیم بالادست،  $u_c$ : سرعت متوسط جریان در شرایط حرکت رسوبات،  $Y$ : عمق جریان در کانال بالادست،  $l$ : طول بال آب‌شکن،  $\alpha$ : زاویه قرارگیری آب‌شکن نسبت به ابتدای قوس است. آب‌شکن‌ها از جنس پلکسی‌گلاس و با ضخامت ۱ (cm) ساخته شدند و برای انجام ۳ آزمایش، آب‌شکن‌ها در زوایای  $30^\circ, 45^\circ$  و  $60^\circ$  به صورت منفرد نسبت به ابتدای قوس نصب شدند، به طوری که جان آب‌شکن بر دیواره‌ی خارجی کانال عمود بود.

سرعت جریان در نقاط مختلف به وسیله‌ی دستگاه سرعت‌سنج صوتی (ADV)<sup>۲</sup> با پراب جانب‌نگر<sup>۳</sup> اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری سرعت با مش‌بندی ارائه‌شده در شکل ۱ انجام شد. بسامد برداشت داده‌های سرعت (HZ) ۱۰۰ در نظر گرفته شد. اگر چه دستگاه مورد استفاده در پژوهش حاضر توانایی برداشت سرعت‌ها تا بسامد (HZ) ۲۰۰ را داشت، اما بسامدهای بالا موجب افزایش اسپایک‌های ورودی به سری زمانی می‌شود و از این رو در پژوهش حاضر، بسامد (HZ) ۱۰۰ در نظر گرفته شد که بیشتر از بسامد در نظر گرفته‌شده در مطالعات پیشین است.<sup>[۲۱ و ۱۸]</sup> مدت زمان برداشت داده‌ها در هر نقطه ۳ دقیقه بود. برای حذف اسپایک‌های موجود در سری زمانی از روش ارائه‌شده در مطالعات پیشین استفاده شد.<sup>[۲۶]</sup> پس از حذف اسپایک‌های موجود در سری زمانی، کمینه‌ی تعداد داده‌های موجود در سری زمانی ۱۰۰۰۰



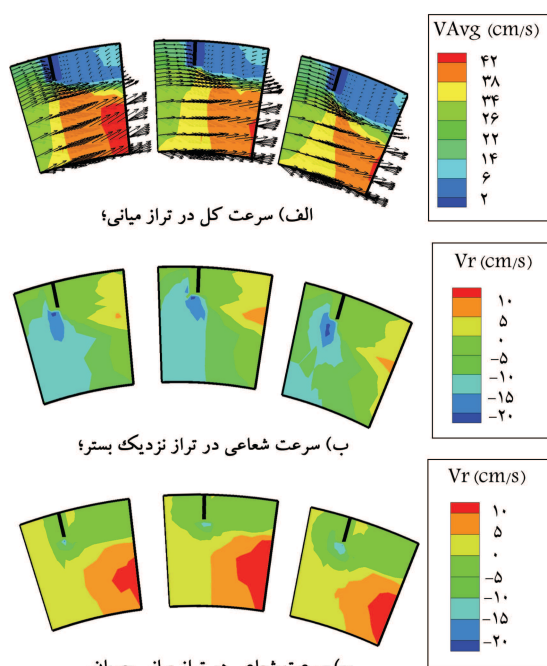
شکل ۱. نمایی از محدوده‌ی برداشت سرعت و نقاطی که در آنها سرعت برداشت شده است.

پیشین عنوان شده است که احتمال ایجاد پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در مناطق مستعد برای آب‌شستگی بیشتر و نیز زوایای اعمال پدیده‌های مذکور نسبت به افق در مناطق مستعد برای آب‌شستگی کمتر بوده است.<sup>[۱۴ و ۱۳]</sup>

در جریان‌های عمدتاً دوبعدی، پدیده‌های اندرکنشی نسبت به پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی کمتر اتفاق می‌افتد.<sup>[۱۵]</sup> پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزایش زبری کف موجب افزایش پدیده‌های اندرکنشی خواهد شد، در حالی که پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی با افزایش زبری بستر کاهش می‌یابند.<sup>[۱۶ و ۱۷]</sup> پژوهش‌های متعددی نیز به صورت خاص در مورد ارتباط بین جریان آشفته اطراف آب‌شکن‌ها و آب‌شستگی اطراف آن‌ها انجام شده است،<sup>[۱۸-۲۲]</sup> و نتایج آن‌ها نشان‌دهنده‌ی حاکمیت پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در نواحی نزدیک آب‌شکن بوده است. اما تنش‌های برشی وارد بر بستر که از روش تنش‌های رینولدز وارد بر بستر تعیین شده‌اند، همبستگی مناسبی با روند آب‌شستگی مشاهده‌شده در اطراف آب‌شکن‌ها نشان نداده‌اند. مطالعات انجام‌شده در مورد میدان جریان اطراف آب‌شکن‌های قرارگرفته در قوس با تأکید بر پارامترهای آشفتگی محدود است.<sup>[۲۳ و ۲۴]</sup> پژوهشگران مذکور با بررسی میدان جریان در نزدیک بستر، سعی در شناخت ارتباط بین میدان جریان و فرایند آب‌شستگی داشتند و نتایج آن‌ها با استفاده از شار انرژی آشفتگی و احتمال ایجاد پدیده‌های چهارگانه نشان داد که در نواحی اطراف آب‌شکن، پدیده‌ی بیرون‌رانی نسبت به سایر پدیده‌ها حاکمیت بیشتری دارد و عامل اصلی آن، انتقال رسوبات به صورت بار معلق در ابتدای آزمایش‌های آب‌شستگی است. با توجه به ساختار سه‌بعدی و پیچیده‌ی جریان در اطراف آب‌شکن‌های قرارگرفته در قوس و با توجه به مطالعاتی که تاکنون در مورد میدان جریان اطراف آب‌شکن‌های قرارگرفته در قوس انجام شده است، نیاز به پژوهش‌های بیشتر در مورد ساختار جریان آشفته با تأکید بر پارامترهای آشفتگی جریان وجود دارد. تاکنون پژوهشی در مورد ارتباط بین میدان جریان اطراف آب‌شکن‌های قرارگرفته در مقاطع مختلف نسبت به ابتدای قوس و فرایند شروع آب‌شستگی انجام نشده است. از این رو در پژوهش حاضر با توجه به پارامترهای آشفتگی جریان اطراف آب‌شکن مانند: میانگین حاصل‌ضرب نوسان‌های سرعت، طیف انرژی آشفتگی، طیف توانی آشفتگی، همبستگی‌های درجه‌های ۳ و ۴ و سهم پدیده‌های چهارگانه در تنش‌های رینولدز میدان جریان اطراف آب‌شکن تیغی قرارگرفته در قوس  $90^\circ$  که در ۳ موقعیت متفاوت از ابتدای قوس قرار دارد و نیز با استفاده از آزمایش‌های آب‌شستگی که در مطالعات پیشین انجام شده است، بررسی ارتباط بین میدان جریان آشفته و فرایند آب‌شستگی و تأثیر محل قرارگیری آب‌شکن در قوس تند در آب‌شستگی انجام شده است.

## ۲. تنظیمات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس در کانالی با قوس  $90^\circ$  انجام شد. عرض و ارتفاع کانال به ترتیب ۰/۶ و ۰/۷ (m) بود و بستر کانال به وسیله‌ی ماسه‌ی تقریباً یکنواخت با قطر متوسط (mm) ۱/۲۸ و انحراف معیار ۱/۳ تا عمق ۰/۳ (m) از بستر پوشانده شد. کانال مورد استفاده در پژوهش حاضر از ۳ بخش

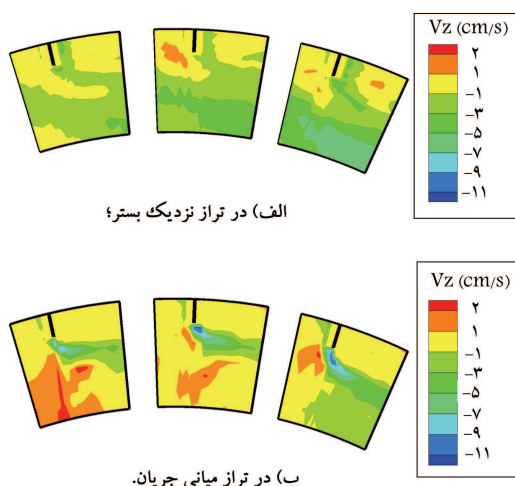


الف) سرعت کل در تراز میانی؛

ب) سرعت شعاعی در تراز نزدیک بستر؛

ج) سرعت شعاعی در تراز میانی جریان.

شکل ۲. تغییرات سرعت در ترازهای مختلف.



الف) در تراز نزدیک بستر؛

ب) در تراز میانی جریان.

شکل ۳. کانتور سرعت‌ها در امتداد عمقی.

نعل اسبی در منطقه‌ی اطراف آب‌شکن است (شکل ۳ الف). در تراز میانی جریان و در بالادست آب‌شکن، جریان رو به بالای ضعیف (علامت مثبت مؤلفه‌ی سرعت عمقی جریان) مشاهده شده است، اما گردابه‌ی نعل اسبی در ناحیه‌ی مذکور مشاهده نمی‌شود و جریان عبوری از روی گردابه‌ی نعل اسبی، جریان رو به بالا را در آنجا ایجاد می‌کند (شکل ۳ ب). در منطقه‌ی جریان برگشتی تشکیل شده در پایین دست آب‌شکن و در تراز میانی، دو ناحیه برای مؤلفه‌ی عمقی جریان مشاهده می‌شود. ناحیه‌ی اول که در انتهای میدان جریان برگشتی قرار دارد (در نواحی نزدیک به پایین دست آب‌شکن) و مؤلفه‌ی عمقی سرعت در آن مثبت است و ناحیه‌ی دوم که در ناحیه‌ی نزدیک دیواره‌ی پایین دست جان آب‌شکن قرار دارد، مؤلفه‌ی عمقی سرعت در آنجا منفی است. وجود دو ناحیه‌ی مذکور، نشان دهنده‌ی جریان ضعیف رو به بالا در ناحیه‌ی اول و جریان رو به پایین در ناحیه‌ی دوم است که در اثر برگشتی جریان در ناحیه‌ی دوم و برخورد آن به رویه‌ی پایین دست آب‌شکن ایجاد می‌شود.

سرعت لحظه‌ای بود.<sup>[۱]</sup> سرعت‌های برداشت شده در دستگاه مختصات استوانه‌ای بر مبنای سرعت‌های مماسی ( $V_t$ )، سرعت‌های شعاعی ( $V_r$ ) و سرعت‌های عمقی ( $V_z$ ) ثبت شدند. جهت مثبت سرعت مماسی به سمت پایین دست کانال، جهت مثبت سرعت شعاعی به سمت ساحل خارجی و جهت مثبت سرعت عمقی به سمت سطح آب در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که برای رسم کانتورهای ارائه شده در ادامه‌ی نوشتار حاضر از نرم‌افزار Tecplot استفاده شده است.

## ۳. نتایج

### ۳.۱. بررسی میدان میانگین جریان

شکل ۲ الف، نشان دهنده‌ی کانتورهای اندازه‌ی بردارهای سرعت در تراز میانی جریان ( $z = 0.5 \text{ cm}$ ) و بردارهای سرعت در ترازهای مختلف است. انحراف بردارهای قرارگرفته در ترازهای میانی جریان به سمت ساحل خارجی و انحراف آن‌ها در لایه‌های نزدیک بستر به سمت ساحل داخلی، نشان دهنده‌ی وجود جریان ثانویه در قوس است. روندهای یکسانی برای جریان در اطراف هر ۳ موقعیت آب‌شکن مشاهده می‌شود. سرعت جریان عبوری از اطراف آب‌شکن‌ها با عبور از مقطع تنگ‌شدگی آب‌شکن افزایش می‌یابد و به بیشینه‌ی مقدار  $42 \text{ cm/s}$  می‌رسد. در منطقه‌ی جریان برگشتی تشکیل شده در پایین دست آب‌شکن نیز منطقه‌ی با سرعت کم که سرعت جریان در آنجا به حدود  $2 \text{ m/s}$  می‌رسد، به وجود می‌آید.

روندهای تقریباً مشابه برای ترازهای دیگر جریان نیز مشاهده می‌شود، با این تفاوت که سرعت جریان در نزدیک بستر در منطقه‌ی انقباض به حدود  $35 \text{ m/s}$  می‌رسد که قابل مقایسه با سرعت جریان ورودی است و به دلیل تأثیر بستر و مرز جامد است. مطابق شکل ۲ ب، در منطقه‌ی نزدیک نوک آب‌شکن، جهت جریان به شدت به سمت ساحل داخلی است که یکی از کارکردهای آب‌شکن‌ها در انحراف جریان نزدیک‌شونده به سمت ساحل داخلی است. درست در بالادست آب‌شکن، در منطقه‌ی که برداشت سرعت‌ها انجام شده است، نیز چنین شرایطی مشاهده می‌شود؛ ولی انحراف جریان به سمت ساحل داخلی در نزدیک نوک آب‌شکن بیشترین مقدار بوده و بین بیشترین مقادیر مشاهده شده که در نزدیک نوک آب‌شکن اتفاق می‌افتد، برای آب‌شکن قرارگرفته در زاویه‌ی  $30^\circ$  نسبت به ابتدای قوس بیشتر است. در محدوده‌ی لایه‌ی برشی شکل‌گرفته در اطراف آب‌شکن نیز بیشترین مقادیر جریان شعاعی به سمت ساحل خارجی مشاهده می‌شود، که می‌توان تأثیر جریان برگشتی تشکیل شده در پایین دست آب‌شکن در جریان عبوری از اطراف آب‌شکن را که باعث مکش جریان به سمت ساحل خارجی می‌شود، عامل اصلی مقادیر زیاد مؤلفه‌ی شعاعی سرعت به سمت ساحل خارجی در ناحیه‌ی مذکور دانست. ساختار جریان شکل‌گرفته در ترازهای میانی کاملاً با ساختار جریان شکل‌گرفته در نزدیک بستر متفاوت است (شکل ۲ ج).

محدوده‌ی تشکیل جریان انحرافی به سمت ساحل داخلی در نزدیک نوک آب‌شکن‌های مورد مطالعه در ترازهای میانی بسیار کوچک بوده است، در حالی که جریان انحرافی به سمت ساحل خارجی در تراز میانی در پایین دست آب‌شکن از منطقه‌ی لایه‌ی برشی شکل‌گرفته فراتر بوده و تا میانه‌ی کانال امتداد یافته است. تفاوت‌های مذکور به دلیل تفاوت جهت جریان ثانویه در امتداد شعاعی در ترازهای مختلف است. وجود ناحیه‌ی با مؤلفه‌ی عمقی منفی سرعت در ناحیه‌ی بالادست آب‌شکن و در ناحیه‌ی نزدیک نوک آب‌شکن، نشان دهنده‌ی وجود جریان برگشتی در ناحیه‌ی مذکور و توسعه‌ی آن در اطراف آب‌شکن، نشان دهنده‌ی ایجاد گردابه‌ی

جدول ۲. روش‌های مختلف برای تعیین تنش برشی وارد بر بستر.

روش مورد استفاده	ملاحظات
$\tau_{Re} = -\rho \overline{v'_\theta v'_z}$	در مورد جریان‌های دوبعدی و با استفاده از روش‌های تک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای کاربرد دارد. [۲۵-۲۳]
$RBSS = \sqrt{(-\rho \overline{v'_\theta v'_z} + -\rho \overline{v'_\theta v'_r})^2 + (-\rho \overline{v'_r v'_z} + -\rho \overline{v'_\theta v'_r})^2}$	روش توسعه‌یافته‌ی تنش‌های رینولدز است که به‌صورت تک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای کاربرد دارد. [۲۰-۱۸]
$\tau_{TKE} = \rho C_\nu TKE$	در رابطه‌ی ذکرشده: $C_\nu = 0.19$ [۳۳-۳۲]
$\tau_{v'_z} = \rho C_\tau \overline{v'^2_z}$	در رابطه‌ی ذکرشده: $C_\tau = 0.09$ [۳۰]

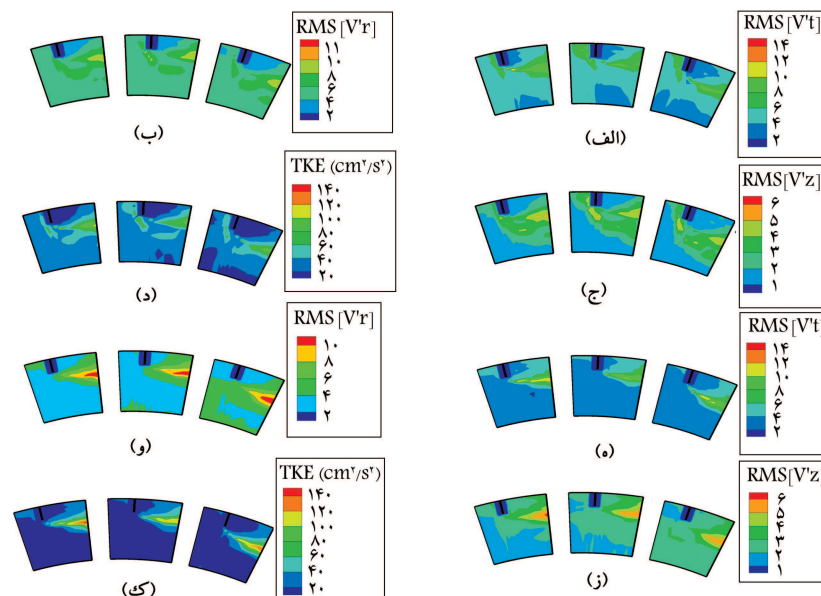
## ۲.۳. بررسی تغییرات پارامترهای آشفتگی

شکل‌های ۴ (الف الی د) نشان‌دهنده‌ی کانتورهای نوسان‌های مؤلفه‌های سرعت در جهات مختلف (RMS*v*) و نیز کانتور انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) در تراز نزدیک بستر است. در نزدیک بستر، بیشترین نوسان‌های سرعت و انرژی جنبشی آشفتگی در لایه‌ی برشی شکل‌گرفته در پایین‌دست و در ناحیه‌ی نزدیک نوک آبشکن و در بالادست آبشکن در مرز جریان برگشتی و جریان نزدیک‌شونده به آبشکن مشاهده می‌شود. در لایه‌های میانی جریان شکل‌های (۴ هـ الی ک)، نوسان‌های سرعت در جهات مختلف و نیز انرژی جنبشی آشفتگی در لایه‌ی میانی و در لایه‌ی برشی شکل‌گرفته در اطراف آبشکن بیشترین مقدار است و مقدار بیشینه‌ی پارامترهای ذکرشده در انتهای میدان جریان برداشت‌شده در لایه‌ی برشی شکل‌گرفته در اطراف آبشکن مشاهده می‌شود. در لایه‌ی نزدیک بستر، بیشترین مقدار نوسان‌های سرعت و انرژی جنبشی آشفتگی در لایه‌ی برشی شکل‌گرفته در اطراف آبشکن که از نوک آبشکن شروع می‌شود و به سمت پایین‌دست آبشکن گسترش می‌یابد، مشاهده می‌شود. تفاوت نوسان‌های سرعت در دو تراز مورد بررسی را می‌توان مربوط به دو عامل تأثیر مستهلک‌کنندگی بستر در آشفتگی جریان و وجود گردابه‌ی نعل اسبی در لایه‌ی نزدیک بستر دانست. چنانچه ملاحظه می‌شود مقادیر بیشینه‌ی انرژی جنبشی آشفتگی در تراز نزدیک بستر جریان به دلیل خاصیت

مستهلک‌کنندگی بستر بر آشفتگی کمتر از تراز میانی جریان است، در حالی که وجود گردابه‌ی نعل اسبی در اطراف آبشکن، ناحیه‌ی با انرژی جنبشی آشفتگی بالا در نزدیک بستر و در بالادست آبشکن ایجاد می‌کند که چنین ناحیه‌ی در تراز میانی جریان مشاهده نمی‌شود.

## ۳.۳. بررسی تنش برشی وارد بر بستر

همبستگی‌های درجه‌ی ۲، یکی از پارامترهای مهم در تجزیه و تحلیل میدان جریان آشفته‌ی موردبررسی است. تنش‌های برشی رینولدز که همبستگی‌های درجه‌ی ۲ نیز نامیده می‌شوند، از یک سو در میانگین‌گیری از معادلات لحظه‌ای حاکم بر جریان به‌وجود می‌آیند و از سویی دیگر، با توجه به مفاهیم فیزیکی با توجه به پخش مومنتم از جنس تنش برشی بین لایه‌های مختلف جریان هستند. استفاده از تنش عمودی رینولدز و نیز انرژی جنبشی آشفتگی نیز در تعیین تنش برشی وارد بر بستر توصیه شده است. [۲۸، ۲۷] پژوهش‌های انجام‌شده نیز نشان‌دهنده‌ی وجود ارتباط خطی بین تنش عمودی رینولدز در جهت عمق جریان و نیز انرژی جنبشی آشفتگی با تنش برشی وارد بر بستر در جریان‌های دریایی هستند. [۲۹ و ۳۰] جدول ۲، نشان‌دهنده‌ی روش‌های ارائه‌شده در پژوهش‌های مختلف برای تخمین تنش برشی وارد بر بستر است. با توجه به اینکه مطابق مقادیر  $(\tau_{TKE})$  و  $(\tau_{v'_z})$  در جدول ۲، ارتباط خطی



الف تا د) نزدیک بستر؛ ه تا ک) تراز میانی جریان.

شکل ۴. کانتور نوسان‌های سرعت در جهات مختلف و انرژی جنبشی آشفتگی در ترازها.

پایین تر هستند و شار آن‌ها در جهات مختلف را تعیین می‌کنند. شکل بی بعد شده‌ی همبستگی‌های درجه‌های ۳ و ۴ را می‌توان از رابطه‌های ۱ و ۲ تعیین کرد:

$$si = \frac{\overline{v_i^2}}{(\overline{v_i'^2})^{\frac{2}{3}}} \quad (1)$$

$$Ei = \frac{\overline{v_i'^2}}{(\overline{v_i'^2})^{\frac{2}{3}}} \quad (2)$$

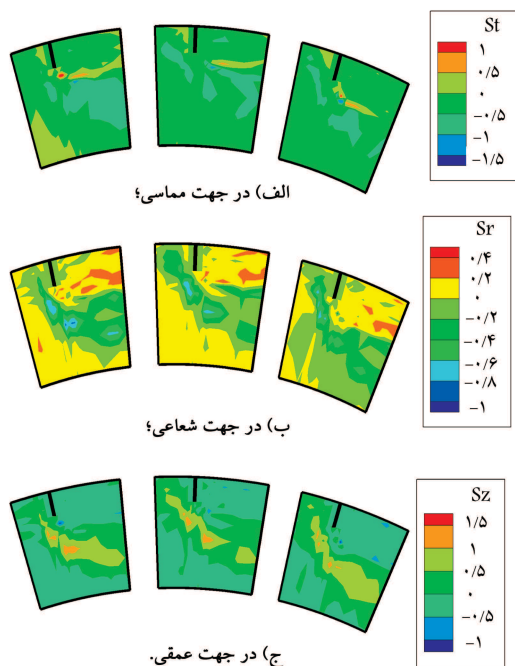
که در آن‌ها،  $si$  همبستگی درجه‌ی ۳ در امتداد  $i$ ،  $Ei$  همبستگی درجه‌ی ۴ در امتداد  $i$  و  $v_i'$  نوسان‌های سرعت در جهت  $i$  هستند. مطابق شکل‌های الف الی ج، در بیشتر مناطق اطراف آب‌شکن‌های مورد مطالعه مقادیر همبستگی‌های درجه‌ی ۳، کوچک و نزدیک به صفر است. از این رو پدیده‌های چهارگانه‌ی انفجار آشفستگی (اندرکنش رو به بیرون، بیرون‌رانی، اندرکنش رو به داخل و جارویی) در این مناطق شدت چندانی ندارند. در محدوده‌ی گردابه‌ی نعل اسبی شکل‌گرفته در اطراف آب‌شکن، مقادیر منفی همبستگی درجه‌ی ۳ در امتداد مماسی مشاهده می‌شود. در مرز این جریان و جریان چرخشی تشکیل‌شده در اطراف آب‌شکن نیز مقادیر مثبت و بزرگ همبستگی‌های درجه‌ی ۳ مشاهده می‌شود. مقادیر منفی مثبت همبستگی درجه‌ی ۳ در امتداد مماسی به ترتیب نشان‌دهنده‌ی شار تنش رینولدز عمودی به سمت بالادست و پایین‌دست است. شکل ۶ب، نشان‌دهنده‌ی همبستگی درجه‌ی ۳ در امتداد شعاعی کانال است. در مرز بین جریان برگشتی در بالادست و جریان نزدیک‌شونده، همچنین در محل تشکیل جریان گردابه‌ی نعل اسبی مقادیر منفی همبستگی‌های درجه‌ی ۳، نشان‌دهنده‌ی این است که در مناطق مذکور، شار تنش‌های رینولدز عمودی در امتداد شعاعی به سمت ساحل داخلی است و نیز شار تنش‌های عمودی در امتداد عمقی جریان، مقادیر مثبت قابل توجهی دارد. در تراز میانی جریان نیز روندهای تقریباً مشابهی از تغییرات همبستگی‌های درجه‌ی ۳ در جهت‌های مختلف مشاهده می‌شود. مقادیر بیشینه‌ی همبستگی‌های درجه‌ی ۴ در جهت مماسی در لایه‌ی برشی شکل‌گرفته در اطراف

بین تنش برشی وارد بر بستر و نوسان‌های سرعت در امتداد عمقی و انرژی جنبشی آشفستگی برقرار است، لذا از شکل‌های ۴ (ج و د) می‌توان برای تعیین روند تغییرات  $\tau_{V'}$  و  $\tau_{TKE}$  در نزدیک بستر استفاده کرد. مطالعات نشان‌دهنده‌ی ارتباط خطی بین تنش عمودی رینولدز در جهت عمق جریان و نیز انرژی جنبشی آشفستگی با تنش برشی وارد بر بستر در جریان‌های دریایی هستند. در جدول ۲، پارامترهای  $r$ ،  $\theta$  و  $z$  نشان‌دهنده‌ی راستاهای مماسی، شعاعی و عمقی هستند و علامت "۱" نشان‌دهنده‌ی نوسان‌های سرعت هاست. با توجه به شکل (۴ج)، بیشینه‌ی نوسان‌های سرعت در امتداد عمقی در لایه‌ی نزدیک بستر برای آب‌شکن‌های قرارگرفته در زوایای  $45^\circ$  و  $60^\circ$  در نزدیک نوک آب‌شکن اتفاق افتاده است، اما برای آب‌شکن قرارگرفته در زاویه‌ی  $30^\circ$ ، در انتهای لایه‌ی برشی قرارگرفته در اطراف آب‌شکن ایجاد شده است.

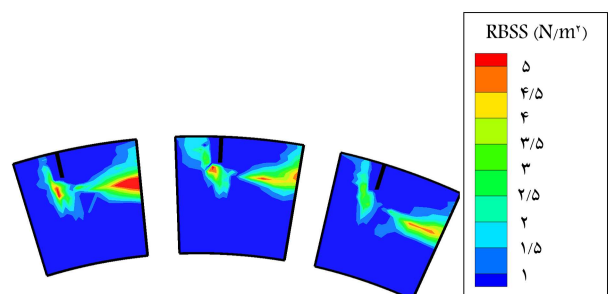
بنابراین انتظار می‌رود تنش‌های برشی وارد بر بستر با استفاده از فرض ارتباط خطی بین نوسان‌های عمقی سرعت و تنش برشی وارد بر بستر برای ۳ موقعیت آب‌شکن مورد بررسی در دو منطقه‌ی کاملاً متفاوت باشد. شکل ۴د، نیز که کانتور انرژی آشفستگی در نزدیک بستر را نشان می‌دهد، با فرض ارتباط خطی بین انرژی جنبشی آشفستگی و تنش‌های برشی وارد بر بستر، نشان‌دهنده‌ی وجود ناحیه‌ی پر تنش در اطراف هر ۳ موقعیت آب‌شکن مورد مطالعه است که از ناحیه‌ی نوک بالادست آب‌شکن تا لایه‌ی برشی شکل‌گرفته در اطراف آب‌شکن امتداد یافته است. با واری داده‌های انرژی جنبشی آشفستگی، مقدار بیشینه‌ی انرژی جنبشی آشفستگی برای هر ۳ آب‌شکن مورد مطالعه در تراز نزدیک بستر در پایین‌دست آب‌شکن اتفاق می‌افتد و با افزایش زاویه‌ی محل قرارگیری آب‌شکن نسبت به ابتدای قوس، مقدار بیشینه‌ی انرژی جنبشی آشفستگی کاهش می‌یابد. چنانچه برای آب‌شکن‌های قرارگرفته در زوایای  $30^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $60^\circ$  نسبت به ابتدای قوس، مقادیر بیشینه‌ی انرژی جنبشی آشفستگی به ترتیب  $111 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ،  $97 \text{ cm}^2/\text{s}^2$  و  $85 \text{ cm}^2/\text{s}^2$  هستند. مطابق شکل ۵، تخمین تنش برشی وارد بر بستر با استفاده از تنش‌های رینولدز، نشان‌دهنده‌ی بیشتر بودن تنش رینولدز در منطقه‌ی لایه‌ی برشی تشکیل‌شده در اطراف آب‌شکن است و مقادیر بیشینه‌ی تنش‌های برشی وارد بر بستر در شرایطی که آب‌شکن در زاویه‌ی  $30^\circ$  نسبت به ابتدای قوس قرارگرفته است، بیشتر از بیشینه‌ی تنش برشی در آب‌شکن‌های قرارگرفته در زوایای  $45^\circ$  و  $60^\circ$  نسبت به ابتدای قوس است (شکل ۵).

### ۴.۳. بررسی همبستگی‌های درجه‌ی بالاتر

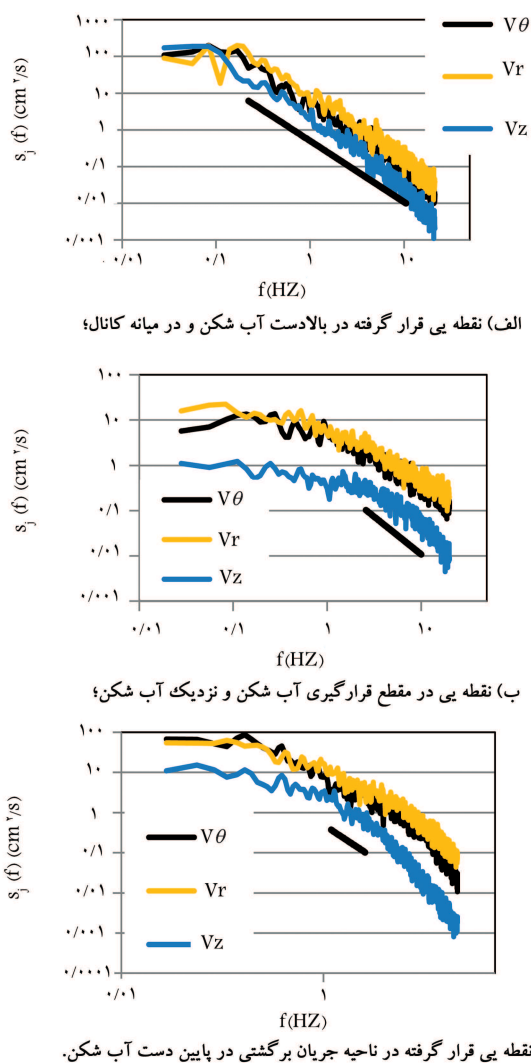
همبستگی‌های درجه‌ی بالاتر (همبستگی‌های درجه‌های ۳ و ۴) با حفظ علامت نوسان‌های سرعت از دیدگاه آماری میانگین وزنی همبستگی‌های یک درجه‌ی



شکل ۶. کانتور همبستگی‌های درجه‌ی ۳ در تراز نزدیک بستر.



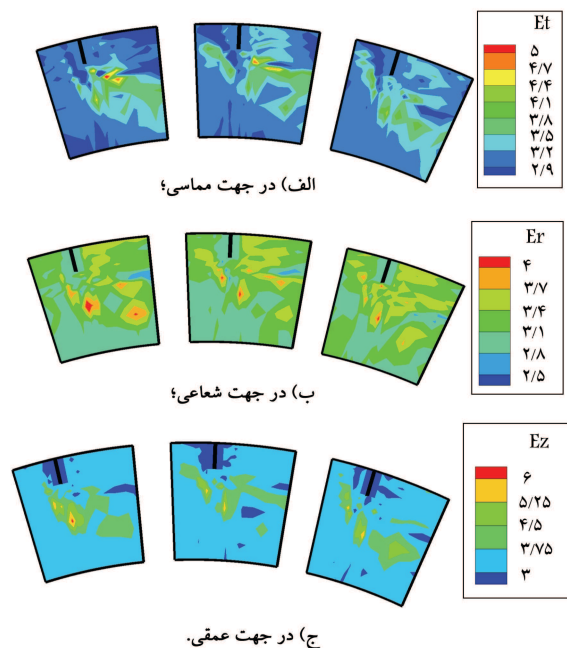
شکل ۵. کانتور تغییرات تنش برشی وارد بر بستر محاسبه‌شده از روش تنش‌های رینولدز توسعه‌یافته.



شکل ۸. طیف‌های انرژی آشفتگی در تراز نزدیک بستر برای آبشکن قرارگرفته در زاویه  $45^\circ$ .

داده‌هاست. برای تعیین طیف آشفتگی با استفاده از تابع اتوکواریانس در بسامدهای مختلف می‌توان از رابطه‌ی ۴ استفاده کرد. طبق مطالعات انجام‌شده برای جریان مورد مطالعه در پژوهش حاضر، بسامد حدی قابل مطالعه  $10^\circ$  (Hz) است.<sup>[۳۱]</sup> چنانچه شکل‌های ۸الف الی ۸ج نشان می‌دهند، طیف انرژی آشفتگی فرایندی آشپاری دارد و از بسامدهای کم به تدریج به بسامدهای بالاتر با طیف انرژی آشفتگی کمتر انتقال می‌یابد. در محدوده‌یی از بسامدها، طیف انرژی آشفتگی از شیب  $\frac{5}{3}$  پیروی می‌کند که زیردامنه‌ی ماند نامیده می‌شود. در محدوده مذکور، میزان انرژی آشفتگی تولیدشده و مصرف‌شده با یکدیگر برابر هستند، اما با توجه به شکل‌های مذکور، نقاط آشفتگی ذکرشده، ایزوتروپ نیستند؛ چرا که ایزوتروپ بودن آشفتگی در محدوده‌ی کوچکی از بسامدها در صورتی که عدد رینولدز جریان به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد، در جریان‌های با مقیاس کوچک مشاهده می‌شود.<sup>[۳۵]</sup>

چنانچه ملاحظه می‌شود، برای ۳ نقطه‌ی در نظر گرفته‌شده در بالادست، محل قرارگیری آبشکن و در محدوده‌ی جریان برگشتی بسامدهای مربوط به زیردامنه‌ی ماند به ترتیب در  $10^\circ-5^\circ$ ،  $10^\circ-2^\circ$  و  $3^\circ-1.5^\circ$  (Hz) مشاهده می‌شوند (شکل‌های ۸الف الی ۸ج). در نقطه‌ی قرارگرفته در ناحیه‌ی جریان برگشتی در محدوده‌ی



شکل ۷. کانتور همبستگی‌های درجه‌ی ۴ در تراز نزدیک بستر.

آبشکن مشاهده می‌شود و در ناحیه‌ی جریان برگشتی نیز مقادیر همبستگی‌های درجه‌ی ۴ در مقایسه با سایر نقاط برداشت سرعت در میدان جریان قابل توجه هستند (شکل‌های ۷الف تا ۷ج). روند مشخصی برای همبستگی‌های درجه‌ی ۴ در نزدیک بستر در امتداد شعاعی مشاهده نشد و اختلاف محسوسی بین مقادیر در نقاط نزدیک بستر وجود ندارد، در حالی که در امتداد عمقی جریان نیز همبستگی‌های درجه‌ی ۴ در لایه‌ی برشی شکل‌گرفته در اطراف آبشکن بیشترین مقدار را دارند.

### ۵.۳. بررسی طیف انرژی جنبشی آشفتگی

بررسی طیف انرژی آشفتگی، اطلاعات مفیدی از ساختار و نحوه‌ی تولید و اتلاف انرژی در بسامدهای مختلف در اختیار قرار می‌دهد. از سویی دیگر، تعیین زیردامنه‌ی ماندی که در آن میزان تولید و اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی یکسان است، از بررسی طیف انرژی جنبشی آشفتگی ممکن است. برای به دست آوردن بسامد و قدرت طیف توانی ساختارهای منظم شکل‌گرفته در جریان نیز باید از طیف انرژی جنبشی آشفتگی استفاده کرد. برای به دست آوردن طیف انرژی جنبشی آشفتگی از تبدیل فوری‌ی تابع اتوکواریانس می‌توان استفاده کرد (رابطه‌ی ۳).

$$Cov_j(\Delta t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T}^T (V_j(t + \Delta t) - \bar{V}_j) (V_j(t) - \bar{V}_j) dt \approx \frac{1}{N-K} \sum_{i=1}^{N-K} (V_{i+Kj} - \bar{V}_j) (V_i - \bar{V}_j) \quad (3)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, N, j = x, y, z$

که در آن،  $N$  تعداد کل داده‌های برداشت‌شده،  $K$  بیشینه‌ی زمان برداشت داده‌ها یا نقطه‌ی برش،  $V$  سرعت لحظه‌یی،  $T$  دوره‌ی تناوب و  $\Delta t$  فاصله‌ی زمانی برداشت



به ریزش گردابه‌ها،  $0.08$  (Hz) است که طبق طیف انرژی آشفتگی (شکل ۸ ب) مربوط به بسامدهای تولید انرژی آشفتگی است. در دو نقطه‌ی دیگر که یکی در بالادست آب‌شکن و دیگری در محل جریان برگشتی وجود دارند، مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی نسبت به نقطه‌ی قرارگیری نوک آب‌شکن ناچیز است.

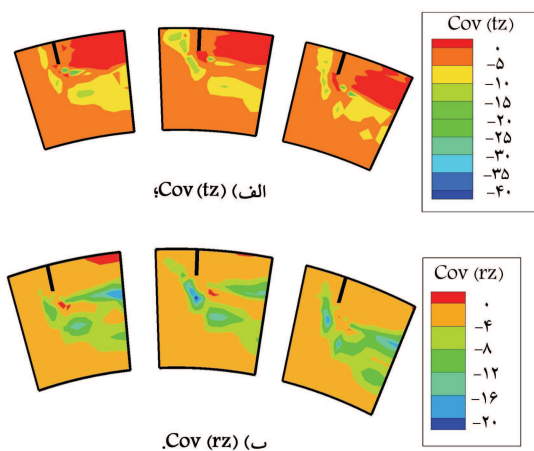
شکل ۹ ب، نشان‌دهنده‌ی طیف توانی آشفتگی برای ۳ نقطه‌ی نزدیک نوک آب‌شکن‌های مورد مطالعه است. طیف توانی در نقاط مذکور، اختلاف محسوسی با یکدیگر ندارند و پیک‌های ساختارهای منظم، همگی در محدوده‌ی تولید انرژی جنبشی آشفتگی و در محدوده‌ی بسامدهای  $0.08-0.1$  (Hz) هستند.

### ۶.۳. بررسی پدیده‌های چهارگانه‌ی انفجار آشفتگی

#### ۱.۶.۳. بررسی میانگین حاصل‌ضرب نوسان‌های سرعت

یکی از روش‌های تعیین روند آب‌شستگی و رسوب‌گذاری در جریان‌ها و نیز تعیین نقاطی که بتانسیل رسوب‌گذاری یا آب‌شستگی را دارند، استفاده از تعیین حاکمیت پدیده‌های چهارگانه‌ی آشفتگی در نزدیک بستر است. برای تعیین پدیده‌های حاکم در هر منطقه می‌توان از میانگین حاصل‌ضرب نوسان‌های سرعت در راستاهای مختلف استفاده کرد که هماهنگ با تنش‌های رینولدز و با علامت قرینه با تنش‌های رینولدز تغییر می‌کنند.

شکل‌های ۱۰ الف و ب، نشان‌دهنده‌ی میانگین حاصل‌ضرب نوسان‌های عمقی در امتدادهای سطحی (امتداد مماسی  $Cov(tz)$  و امتداد شعاعی  $Cov(rz)$ ) در لایه‌ی نزدیک بستر برای ۳ موقعیت آب‌شکن مورد مطالعه است. در محدوده‌ی وسیعی از جریان عبوری از اطراف هر ۳ موقعیت آب‌شکن، مقادیر  $Cov(tz)$  منفی است. اما در محل تشکیل جریان برگشتی،  $Cov(tz)$  مثبت است. مقادیر بیشینه‌ی قدرمطلق  $Cov(tz)$  در مرز ناحیه‌ی جریان برگشتی در بالادست آب‌شکن و جریان نزدیک‌شونده به آب‌شکن و در امتداد لایه‌ی برشی شکل‌گرفته در اطراف آب‌شکن ایجاد می‌شوند. در امتداد شعاعی،  $Cov(rz)$  در لایه‌ی نزدیک بستر تقریباً در تمام نقاط مورد بررسی مقادیر منفی دارند و قدرمطلق بیشینه‌ی آن در لایه‌ی برشی شکل‌گرفته در اطراف آب‌شکن ایجاد می‌شود. منفی بودن مقادیر در لایه‌ی برشی تشکیل‌شده در اطراف آب‌شکن در هر دو امتداد مماسی و شعاعی در لایه‌ی برشی، نشان‌دهنده‌ی حاکمیت پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی در نواحی مذکور است. در ناحیه‌ی جریان برگشتی شکل‌گرفته در اطراف آب‌شکن، مثبت بودن مقادیر  $Cov(tz)$  و  $Cov(rz)$  در امتداد مماسی می‌تواند ناشی از حاکمیت



شکل ۱۰. کانتور میانگین حاصل‌ضرب نوسان‌های سرعت در امتداد.

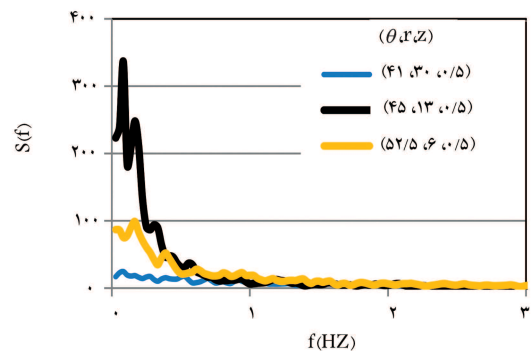
وسیع‌ی از بسامدها، شیب طیف انرژی آشفتگی از مقدار  $\frac{5}{3}$  - بیشتر بوده است که نشان‌دهنده‌ی اتلاف بیشتر انرژی جنبشی آشفتگی نسبت به تولید آن در بسامدهای ذکر شده است.

بسامدهای اتلاف انرژی برای دو نقطه‌ی دیگر مورد بررسی در محدوده‌ی بسامدهای بزرگ‌تر از  $10$  (Hz) اتفاق می‌افتد که با توجه به بیشتر بودن از بسامد حادی به‌طور قطع در مورد آن‌ها نمی‌توان اظهار نظر کرد. در نقطه‌ی بی که در مقطع قرارگیری جان آب‌شکن است، علی‌رغم اینکه طیف انرژی آشفتگی در بسامدهای کوچک، مقادیر بزرگ‌تری نسبت به دو نقطه‌ی دیگر است، اما شیب اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی در بسامدهای بزرگ‌تر، بیشتر بوده است که نشان‌دهنده‌ی بیشتر بودن میزان اتلاف انرژی در بسامدهای ذکر شده است.

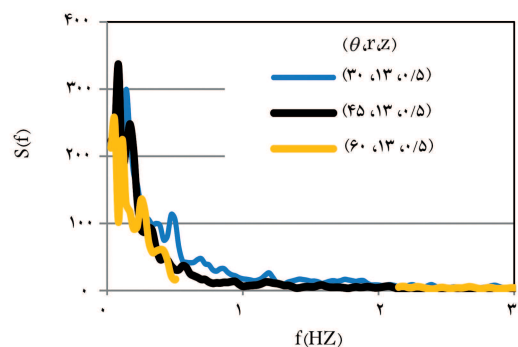
در نقطه‌ی قرارگرفته در بالادست آب‌شکن در محدوده‌ی وسیع‌تری از بسامدها  $(5-50)$  (Hz) نسبت به دو نقطه‌ی دیگر، طیف انرژی آشفتگی شیبی کمتر از  $\frac{5}{3}$  - داشته است که نشان می‌دهد در بسامدهای ذکر شده انرژی جنبشی آشفتگی تولید می‌شوند. برای استخراج بسامدها و توان طیف انرژی آشفتگی می‌توان از طیف توانی آشفتگی استفاده کرد (رابطه‌ی ۴).

$$S(f) = \left\{ s_u(f)^2 + s_v(f)^2 + s_w(f)^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

شکل‌های ۱۱ الف و ب، نشان‌دهنده‌ی طیف انرژی آشفتگی برای نقاط مختلف هستند. چنانچه ملاحظه می‌شود، وجود پیک‌هایی در نقطه‌ی قرارگرفته در مقطع قرارگیری آب‌شکن، نشان‌دهنده‌ی وجود ساختارهای گردابه‌ی منظم در نقطه‌ی پیک و تولید انرژی آشفتگی در آنجاست. ساختارهای گردابه‌ی ذکر شده می‌تواند مربوط به ریزش گردابه‌هایی باشد که از نوک آب‌شکن جدا می‌شوند. بسامد پیک مربوط



الف) نقاط مختلف در شرایطی که آب‌شکن در زاویه ۴۵ درجه قرار دارد؛



ب) در نزدیک نوک آب‌شکن برای شرایطی که آب‌شکن‌ها در زوایای مختلف نسبت به ابتدای قوس قرار دارند.

شکل ۹. تغییرات طیف توانی آشفتگی.

#### ۴. بحث

مطابق مطالعات پیشین، شروع آب‌سستگی از نواحی نزدیک نوک آب‌شکن آغاز می‌شود و در امتداد مرز بین جریان عبوری از اطراف آب‌شکن و جریان برگشتی تشکیل می‌شود در پایین‌دست آب‌شکن گسترش می‌یابد.<sup>[۹-۱۱]</sup> در ابتدای آزمایش‌های آب‌سستگی، انتقال رسوبات به‌صورت بار معلق بود، اما با گذشت زمان و با کم شدن قدرت جریان برای حمل رسوبات از منطقه‌ی نزدیک نوک آب‌شکن، فرایند آب‌سستگی به رژیم بار بستر تبدیل می‌شود. مطالعات پیشین نشان داد که میزان آب‌سستگی ایجادشده در اطراف آب‌شکن‌های قرارگرفته در قوس تند با افزایش زاویه‌ی قرارگیری آب‌شکن تیغه‌یی نسبت به ابتدای قوس کاهش می‌یابد.<sup>[۸]</sup>

با توجه به پژوهش‌های پیشین که نشان دادند آب‌سستگی از مناطق نزدیک به نوک آب‌شکن آغاز می‌شود و در لایه‌ی برشی امتداد می‌یابد و چنانچه مطالعات انجام‌شده نشان داده است، بیشینه‌ی عمق حفزه‌ی آب‌سستگی در شرایطی که آب‌شکن در زاویه‌ی ۳۰°، ۴۵° و ۶۰° نسبت به ابتدای قوس تند قرار گرفته باشد، به ترتیب ۱/۶۷، ۱/۶ و ۱/۵ برابر عمق جریان است.<sup>[۸]</sup> می‌توان نتیجه گرفت که تنش‌های برشی که بر مبنای فرضیه‌ی خطی بودن تغییرات تنش برشی با انرژی جنبشی آشفته‌گی و نوسان‌های عمقی سرعت به‌دست آمده‌اند، نمی‌توانند مناطقی که آب‌سستگی از آن‌ها آغاز می‌شود را به‌درستی پیش‌بینی کنند. چرا که تفاوت چندانی بین مقادیر انرژی جنبشی آشفته‌گی در نزدیک بستر و در نزدیک نوک آب‌شکن و نیز در مقادیر نوسان‌های مؤلفه‌ی عمقی سرعت برای هر ۳ آب‌شکن مورد مطالعه وجود ندارد، در حالی که طبق مطالعات پیشین، میزان آب‌سستگی با افزایش فاصله‌ی قرارگیری آب‌شکن نسبت به ابتدای قوس افزایش می‌یابد.<sup>[۸]</sup>

روش تخمین تنش‌های برشی وارد بر بستر با استفاده از تنش‌های رینولدز نیز همانند روش‌های تخمین تنش برشی وارد بر بستر با استفاده از نوسان‌های عمقی سرعت و انرژی جنبشی آشفته‌گی در تعیین نقاط مستعد برای آب‌سستگی و نرخ مقایسه‌ی آب‌سستگی ایجادشده در اطراف ۳ آب‌شکن مورد مطالعه، ناتوان است. زیرا در روش مذکور، بیشینه‌ی تنش برشی وارد بر بستر برای آب‌شکن قرارگرفته در موقعیت ۳۰° از قوس، در انتهای لایه‌ی برشی ایجاد شده است، در حالی که آب‌سستگی از نواحی نزدیک نوک آب‌شکن آغاز می‌شود. از سویی دیگر، مقادیر تنش برشی وارد بر بستر که با استفاده از روش تنش رینولدز توسعه‌یافته به‌دست آمده‌اند، مقادیر تنش برشی را در نزدیک نوک آب‌شکن برای آب‌شکن قرارگرفته در زاویه‌ی ۳۰° و ۴۵° تقریباً مقادیر یکسانی ارائه می‌دهند، در حالی که مقدار آب‌سستگی در اطراف آب‌شکن ۳۰° بیشتر از آب‌شکن ۴۵° است و این خود دلیل دیگری است که روش محاسبه‌ی تنش برشی برای تعیین نقاط مستعد و میزان آب‌سستگی ایجادشده در اطراف آب‌شکن مناسب نیست. با توجه به علامت‌های همبستگی‌های درجه‌ی ۳ می‌توان چنین نتیجه گرفت که در ناحیه‌ی لایه‌ی برشی شکل‌گرفته در اطراف آب‌شکن و در بالادست آب‌شکن، پدیده‌های بیرون‌رانی در جهات مماسی و شعاعی حاکم است و همراه شدن پدیده‌ی بیرون‌رانی حاکم در نواحی اطراف آب‌شکن و در بالادست آب‌شکن به‌همراه تناوب زیاد پدیده‌ی بیرون‌رانی در امتداد شعاعی که از همبستگی‌های درجه‌ی ۴ استنتاج می‌شود، از عوامل انتقال رسوب در نواحی ذکرشده در مراحل ابتدای آب‌سستگی است. با توجه به اینکه طیف توانی آشفته‌گی، مقادیر بزرگی در نزدیک نوک آب‌شکن دارد، می‌توان به این نتیجه رسید که ساختارهای منظم شکل‌گرفته در ناحیه‌ی نزدیک

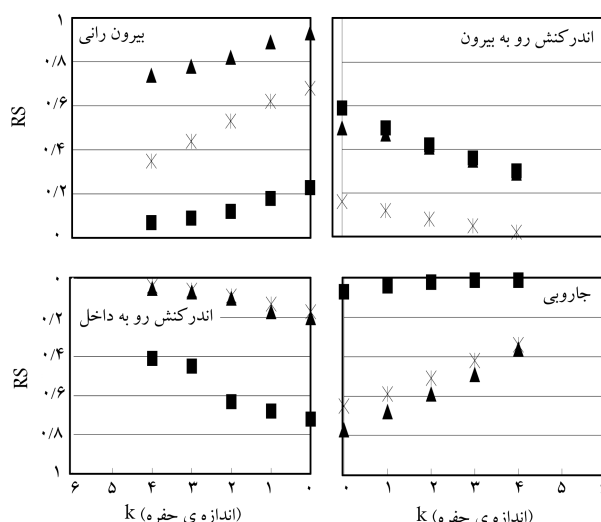
پدیده‌های اندرکنشی در راستای مماسی باشد. تشدید پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در لایه‌ی برشی تشکیل‌شده در اطراف آب‌شکن می‌تواند به‌دلیل تشکیل گردابه‌ی نعل اسبی و ریزش گردابه‌های جدادشده از نوک آب‌شکن باشد که در لایه‌ی برشی توسعه می‌یابد.

برای تعیین حاکمیت پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در لایه‌ی برشی و پدیده‌های اندرکنش رو به داخل و اندرکنش رو به خارج در جریان برگشتی تشکیل‌شده در پایین‌دست آب‌شکن می‌توان سهم هرکدام از پدیده‌ها ( $RS$ ) را در تنش‌های رینولدز تعیین کرد. برای در نظر گرفتن پدیده‌های اثرگذار در سری زمانی، معمولاً محدوده‌ی به‌عنوان مرز پدیده‌های قوی و ضعیف در سری زمانی ارائه می‌شود (رابطه‌ی ۵):

$$x_Q = \begin{cases} 1 & \text{if } |v'_j v'_z| \geq k \cdot \sqrt{v'^2_j} \cdot \sqrt{v'^2_z} \\ 0 & \text{if } |v'_j v'_z| < k \cdot \sqrt{v'^2_j} \cdot \sqrt{v'^2_z} \end{cases} \quad (5)$$

که در آن، هر چه مقدار  $k$  (اندازه‌ی حفزه) بزرگ‌تر انتخاب شود، پدیده‌های با قدرت بیشتر در سری زمانی در نظر گرفته می‌شوند. شکل ۱۱، نشان‌دهنده‌ی تغییرات پدیده‌های حاکم در ۳ نقطه‌ی در نظر گرفته‌شده در بالادست، لایه‌ی برشی و جریان برگشتی تشکیل‌شده در اطراف آب‌شکن است.

چنانچه ملاحظه می‌شود، در بالادست آب‌شکن (نقطه‌ی ۱) پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی، سهم تقریباً یکسانی در تنش رینولدز مماسی دارند و پدیده‌های اندرکنشی، سهم کمتری نسبت به پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در تنش رینولدز مماسی دارند. در نقطه‌ی ۲ که در نزدیک نوک آب‌شکن در نظر گرفته شده است، باز هم سهم پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در تنش رینولدز مماسی بیشتر از پدیده‌های اندرکنشی است. تفاوت ملاحظه‌شده در نقطه‌ی ۲، بیشتر بودن سهم پدیده‌ی بیرون‌رانی نسبت به پدیده‌ی جاروبی در ناحیه‌ی نزدیک نوک آب‌شکن است. پدیده‌های اندرکنشی نسبت به پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در ناحیه‌ی جریان برگشتی سهم بیشتری در تنش رینولدز مماسی دارند و سهم پدیده‌ی اندرکنش رو به داخل نسبت به اندرکنش رو به بیرون سهم بیشتری در تنش رینولدز مماسی دارد.



شکل ۱۱. تغییرات سهم پدیده‌های چهارگانه‌ی انفجار آشفته‌گی در تنش رینولدز مماسی در ۳ نقطه برای مقادیر مختلف اندازه‌ی حفزه.



کاهش می‌دهد و موجب ته‌نشینی رسوبات در آنجا در ابتدای آزمایش‌های آب‌شستگی خواهد شد.

## ۵. نتیجه‌گیری

۱. بیشترین مقدار نوسان‌های سرعت در اطراف آب‌شکن‌های مورد بررسی در لایه‌ی برشی تشکیل شده در اطراف آب‌شکن بود و با توجه به فرضیه‌ی ارتباط خطی بین تنش‌های برشی وارد بر بستر و نوسان‌های عمقی و انرژی جنبشی آشفتگی، ارتباط مناسبی بین پارامترهای آشفتگی و آب‌شستگی ایجاد شده در اطراف آب‌شکن‌ها به دست نیامد.

۲. محاسبه‌ی تنش برشی با استفاده از تنش‌های رینولدز در لایه‌ی نزدیک بستر همانند نتایج به دست آمده از مطالعات پیشین، روش مناسبی برای پیش بینی نقاط مستعد آب‌شستگی در اطراف جریان‌های پیچیده نیست.

۳. بررسی همبستگی‌های درجه‌های ۳ و ۴، نشان‌دهنده‌ی وجود پدیده‌های بیرون‌رانی با تناوب زیاد در اطراف آب‌شکن است که می‌تواند عامل اصلی آب‌شستگی در اطراف آب‌شکن باشد. حاکمیت پدیده‌ی بیرون‌رانی در لایه‌ی برشی و پدیده‌ی اندرکنش رو به داخل در جریان برگشتی شکل‌گرفته با استفاده از سهم پدیده‌های ذکر شده در تنش‌های رینولدز نیز اثبات شد.

۴. طیف‌های توانی به دست آمده از طیف انرژی آشفتگی، نشان‌دهنده‌ی وجود پیک‌هایی در بسامدهای تولید انرژی آشفتگی هستند که می‌تواند به دلیل ریزش گردابه‌ها از نوک آب‌شکن تیغه‌یی باشد.

نوک آب‌شکن، توانایی زیادی برای انتقال رسوب از این ناحیه به سمت پایین دست کانال دارند و احتمال شروع آب‌شستگی از آنجا نسبت به سایر نقاط بیشتر است و می‌توان نتیجه گرفت که همبستگی خوبی بین طیف توانی و فرایند آب‌شستگی در اطراف آب‌شکن وجود دارد. با توجه به حاکمیت پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی در امتداد مماسی و شعاعی در لایه‌ی برشی می‌توان انتظار داشت که نواحی مذکور، مستعد برای آب‌شستگی باشند و از آنجایی که آب‌شستگی از نوک آب‌شکن آغاز می‌شود و در امتداد لایه‌ی برشی گسترش می‌یابد، می‌توان نتیجه گرفت که همبستگی مناسبی بین پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی و پدیده‌ی آب‌شستگی وجود دارد. در ناحیه‌ی جریان برگشتی، حاکمیت پدیده‌های اندرکنشی یکی از عوامل کاهش تنش برشی وارد بر بستر در ناحیه‌ی مذکور است و می‌تواند یکی از عوامل ته‌نشینی رسوبات در ابتدای آزمایش‌های آب‌شستگی در ناحیه‌ی جریان برگشتی باشد.

با توجه به سهم پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی در تنش برشی وارد شده بر بستر در بالادست آب‌شکن و در نزدیک نوک آب‌شکن می‌توان انتظار داشت که نواحی مذکور، نواحی مستعد آب‌شستگی هستند، اما با توجه به اینکه در بالادست آب‌شکن تنش برشی وارد بر کف برای انتقال رسوبات کافی نیست، جابه‌جایی رسوبات در این مناطق انجام نمی‌شود. با این حال در منطقه‌ی نزدیک نوک آب‌شکن، بیشتر بودن سهم پدیده‌ی بیرون‌رانی باعث انتقال رسوبات عمدتاً به صورت بار معلق در ابتدای انجام آزمایش‌های آب‌شستگی است. در ناحیه‌ی جریان برگشتی نیز سهم بیشتر پدیده‌های اندرکنشی به خصوص اندرکنش رو به داخل که ناشی از کاهش سرعت جریان در ناحیه‌ی جریان برگشتی است، تنش‌های برشی وارد بر بستر را

## پانویس‌ها

1. orifice plate
2. acoustic doppler velocimeter
3. side looking probe

## منابع (References)

1. Yaeger, M.A. "Mean flow and turbulence around two series of experimental dikes", Msc thesis, University of Arizona (2009).
2. Pagliara, S., Hassanabadi, L. and Mahmoudi Kurdistan, S. "Clear water scour downstream of Log deflectors in horizontal channels", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **141**(9), pp. 1-8 (2015).
3. Noorbakhsh, S.M. "Experimental investigation on scour around a emerged spur dike in a straight channel", Msc Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (2011).
4. Acharya, A. "Experimental study and numerical simulation of flow and sediment transport around a series

of spur dikes", PhD Thesis, University of Arizona, USA (2011).

5. Khosravi Mashizi, M. "Experimental study of scour and flowfield around a submerged T shaped spur dike in a 90<sup>0</sup> bend", Msc Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (2011).
6. Moosavi Naeini, A. "Experimental investigation on flow field around a T shaped sour dike in a 90<sup>0</sup> bend", Msc Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (2009).
7. Shariatzadeh, Y. "Experimental study on scour and flow-field around an attracted and repelling spur dike in a 90<sup>0</sup> bend", Msc Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (2011).
8. Fazli, M. "Experimental study on flow field and scour around a spur dike in a 90<sup>0</sup> bend", PhD Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (2008).
9. Vaghefi, M. "Experimental study on flow field and scour around a T shaped spur dike in a 90<sup>0</sup> bend", PhD Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (2009).

10. Bridge J.S. and Bennett S.J. "A model for entrainment and transport of sediment grains of mixed sizes, shapes and densities", *Water. Resour. Res.*, **28**(2), pp. 337-363 (1992).
11. Thorne, P.D., Williams, J.J. and Heathershaw, A.D. "In situ acoustic measurements of marine gravel threshold and transport", *Sedimentology*, **36**(1), pp. 61-74 (1989).
12. Nelson, J.M., Shreve, R.L., Mclean, S.R. and Drake, T.G. "Role of near-bed turbulence structure in bed load transport and bed form mechanics", *Water. Resour. Res.*, **31**(8), pp. 2071-2086 (1995).
13. Mianaei, S. and Keshavarzy, A.R. "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 (2008).
14. Keshavarzy, A.R. and Gheisi, A.R. "Stochastic nature of three dimensional bursting events and sediment entrainment in vortex chamber", *Stoch. Env. Res. Risk.*, **A.21**(1), pp. 75-87 (2006).
15. Nezu, I. and Nakagawa, H. "Turbulent in open-channel flow." IAHR Monograph Series, Balkema, Rotterdam, The Netherlands. Taylor and Francis (1993).
16. Kaftori, D., Hestroni, G. and Banerjee, S. "The effect of particles on wall turbulence", *Int. J. Multiphase Flow*, **24**(3), pp. 359-386 (1998).
17. Papanicolaou, A.N., Diplas P., Dancy C. L. and Balakrishnan M. "Surface roughness effects in near-bed turbulence: Implication to sediment entrainment", *J. Eng. Mech.*, **127**(3), pp. 211-218 (2001).
18. Dey, S. and Barbhuiya, A.K. "Velocity and turbulent in a scour hole at a vertical-wall abutment", *Flow. Meas. Instrum.*, **17**(1), pp. 13-21 (2006).
19. Duan, J.G. "Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike", *J. Hydraul. Eng.*, **135**(10), pp. 803-811 (2009).
20. Duan, J., He, L., Wang, G. and Fu, D. "Turbulent burst around experimental spur dike", *J. Hydraul. Eng.*, **26**(4), pp. 471-786 (2009).
21. Kuhnle, R.A., Alonso, C.V. and Jia, Y.J. "Flow around a submerged trapezoidal spur dike test case", *J. Hydraul. Eng.*, **128**(12), pp. 1087-1093 (2008).
22. Kuhnle, R.A. and Alonso, C.V. "Flow near a model spur dike with a fixed scoured bed", *Int. J. Sediment. Res.*, **28**(3), pp. 349-357 (2013).
23. Mehraein, M., Najibi, S.A. and Ghodsian, M. "Location effect on near bed flow structure around a straight spur dike", *Proceeding of 9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering*, pp. 173-176 (2014).
24. Mehraein, M., Ghodsian, M. and Najibi, S.A. "Experimental investigation on the flow field around a spur dike in a 90° sharp bend", *Proceeding of Riverflow Conference*, pp. 743-749 (2014).
25. Leschziner, M.A. and Rodi, W. "Calculation of strongly curved open channel flow", *J. Hydraul. Div.*, **105**(10), pp. 1297-1314 (1979).
26. Goring, D. and Nikora, V. "Despiking acoustic doppler velocimeter data", *J. Hydraul. Eng.*, **128**(1), pp. 117-126 (2002).
27. Stapleton, K.R. and Huntley D.A. "Seabed stress determination using the inertial dissipation method and the turbulent kinetic energy method", *Earth. Surf. Proc. Land.*, **20**, pp. 807-815 (1995).
28. Huthnance, J.M., Humphery, J.D., Knight, P.J., Chatwin, P.G., Thomsen, L. and White, M. "Near-bed turbulence measurements, stress estimates and sediment mobility at the continental shelf edge", *Prog. Oceanogr.*, **52**(2-4), pp. 171-194 (2002).
29. Bagherimeyab, F., Albayrak, I. and Lemmin, U. "Bed shear velocity estimates in rough open-channel flow obtained from acoustic doppler velocity profiler data and direct bed shear stress measurements", *Proceeding of River Flow Conference*, pp. 1-8 (2008).
30. Kim H.T., Kline S.J. and Reynolds W.C. "The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer", *J. Fluid. Mech.*, **50**(1), pp. 133-160 (1971).
31. Nikora, V. and Goring, D. "Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds", *J. Hydraul. Eng.*, **126**(9), pp. 679-690 (2000).
32. Song, T. and Chiew, Y.M. "Turbulence measurement in nonuniform open-channel flow using acoustic Doppler velocimeter (ADV)", *J. Eng. Mech.*, **127**(3), pp. 219-232 (2001).
33. Chen, X. and Chiew, Y.M. "Response of velocity and turbulence to sudden change of bed roughness in open-channel flow", *J. Hydraul. Eng.*, **129**(1), pp. 35-43 (2003).
34. Soulsby, R.L., *The Bottom Boundary-Layer in Shelf Seas*, In Physical Oceanography of Coastal and Shelf Areas, Johns B (ed.). Elsevier:Amsterdam, pp. 189-266 (1983).
35. Monin, A.S. and Yaglom, A.M., *Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence*, MIT Press, Cambridge, Mass (1971).