

تحلیل شرایط غیر ایزوتروپ جریان عبوری از اطراف آبشکن‌های تیغه‌ای و T شکل

مجتبی مهرآیین

استادیار گروه عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران

mehraein@khu.ac.ir

چکیده - در تحقیق حاضر میدان جریان اطراف آبشکن‌های T شکل و تیغه‌ای با هدف تعیین کمی میزان غیر ایزوتروپ بودن جریان اطراف این نوع آبشکن‌ها برای داشتن تخمینی از قابلیت مدل‌های عددی که بر پایه آشفتگی ایزوتروپیک جریان ارایه شده است، انجام می‌شود. آزمایش‌ها در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس در کانالی با قوس تند 90 درجه انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که روند مشابهی بین میزان غیر ایزوتروپ بودن جریان در اطراف آبشکن T شکل و مستغرق وجود دارد. در بالادست آبشکن و در تراز نزدیک بستر شرایط آشفتگی دو مؤلفه‌ای که در بعضی از نقاط به صورت آشفتگی دیسکی می‌باشد، مشاهده شد؛ در حالی که در نقاط قرار گرفته در ترازهای میانی کانال، آشفتگی به دلیل حذف تأثیرات بستر، بیشتر از نزدیک بستر به شرایط ایزوتروپ نزدیک می‌شود. در نواحی تشکیل جریان‌های چرخشی، همانند نقاط قرار گرفته در محل تشکیل گردابه نعل اسبی و ناحیه جریان چرخشی ایجاد شده در پایین دست آبشکن شرایط آشفتگی، بیشتر از سایر نقاط به شرایط ایزوتروپیک نزدیک می‌شود. با استفاده از شکل المان تانسورهای غیر ایزوتروپیک و مقایسه با روش‌های BM و AIM روش BM نتایج مناسبتری ارایه کرد.

کلید واژگان: مطالعات آزمایشگاهی، غیر ایزوتروپ، آبشکن T شکل، آبشکن تیغه‌ای.

1- مقدمه

محدوده قابل قبول از تنش‌های رینولدز را تعیین کرده و با توجه به نزدیکی به مرزها و رئوس نقشه، تخمینی از میزان غیر ایزوتروپیک بودن آشفتگی جریان در هر نقطه ارایه می‌کنند. از روش ارایه شده توسط این محققان، جووانوویچ و همکاران (2003) برای مدل‌سازی آشفتگی استفاده کردند. کیم و همکاران (1987) از این روش برای تخمین میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان درون کانال استفاده کردند و نشان دادند که آشفتگی جریان در میانه کانال تقریباً ایزوتروپیک می‌باشد. تحقیقات انجام شده توسط کروگستاد و توربرسن (2000) نیز از این روش برای تعیین میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان درون لوله استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در نقاط قرار گرفته در مرکز لوله شرایط جریان با شرایط

از دیدگاه محاسباتی داشتن تخمینی از میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان مهم می‌باشد. چرا که مدل‌سازی غیر ایزوتروپیک تانسور تنش‌های رینولدز مساله‌ای بسیار مهم در مدل‌سازی تنش‌های رینولدز بوده و میزان انحراف از شرایط ایزوتروپیک تأثیر زیادی بر میزان دقت مدل‌سازی‌های عددی دارد که بر مبنای آشفتگی ایزوتروپیک استخراج شده‌اند. تحلیل‌های متنوعی در مورد میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان‌ها انجام شده است که یکی از مهمترین روش‌ها در تعیین میزان غیر ایزوتروپیک بودن آشفتگی جریان استفاده از نقشه ثابت غیر ایزوتروپیک (AIM) می‌باشد که توسط لاملی (1977) و لاملی و نیومان (1978) ارایه شده است. این نقشه‌ها

جمله آنها می توان به مجموعه تحقیقات انجام شده در دانشگاه تربیت مدرس، شامل فضلی (1388)، واقفی (1389) خسروی (1390)، شریعت زاده (1390) اشاره کرد. همچنین یکی از جدیدترین تحقیقات توسط پاگلیرا و همکاران (2015) انجام شده است. در مورد میدان جریان شکل گرفته در اطراف آبشکن نیز تا به حال تحقیقات متنوعی انجام شده است که از جمله این تحقیقات می توان به مجموعه تحقیقات انجام شده در دانشگاه آریزونا همانند دوان و همکاران (2009 و 2011) و نیز تحقیقات انجام شده در موسسه تکنولوژی هند در خاراگپور از جمله دی و بارباهویا (2005 و 2006 a و 2006 b) اشاره کرد. نتایج این تحقیقات نشان داد که گردابه نعل اسبی سهم مهمی در انتقال رسوبات داشته و پدیده های بیرون رانی و جاروبی در اطراف نوک آبشکن حاکم بوده، از این رو سهم اصلی در انتقال رسوبات بسمت پایین دست در این منطقه دارند. تحقیقات انجام شده در مورد آبشکن های T شکل قرار گرفته در مسیر مستقیم که توسط مهرآیین و همکاران (1394) انجام شده است، نشان داد که انتقال رسوبات در ابتدای فرایند آبشستگی از نوک آبشکن به دلیل حاکمیت پدیده های بیرون رانی در این منطقه بوده که حاکمیت این پدیده در نوک آبشکن بوسیله تحلیل های انجام شده در مورد پارامترهای مختلف آشفتگی به اثبات رسیده است. منصوری و همکاران (2012 a و 2012 b) به بررسی تأثیرات شکل آبشکن های سری بر ساختار جریان آشفتنه شکل گرفته در اطراف سری آبشکن ها پرداختند. صفرزاده و همکاران (2010 و 2016) نیز میدان جریان آشفتنه اطراف آبشکن تیغه ای و T شکل را در مسیر مستقیم بررسی کردند. استنتاج های این محققان از میدان جریان آشفتنه و تنش های رینولدز نزدیک بستر نشان داد که میزان آبشستگی در اطراف آبشکن های T شکل کمتر از آبشکن های تیغه ای می باشد.

با توجه به تحقیقات انجام شده در مورد آبشکن ها و بررسی میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان ها، تا به حال تحقیقی در مورد میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان عبوری در اطراف آبشکن ها انجام نشده است و در این زمینه انجام تحقیق برای داشتن تخمینی از میزان قابلیت

ایزوتروپیک کاملاً متفاوت است. چانگ و سانگ (2005) از این روش برای بررسی میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان درون دو استوانه که استوانه داخلی در حال چرخش است، استفاده کرد.

یکی از تحقیقات جدید انجام شده در مورد استفاده از این روش برای تعیین میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان در شرایط سه مؤلفه ای و وجود سازه ای در مسیر حرکت جریان، توسط سارکار و دی (2015) انجام شده است که میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان در حضور لوله ای افقی در مسیر حرکت جریان درون کانال مطالعه شده است. علاوه بر این، اگر چه که روسینوا (2009) به دلیل در دسترس نبودن مولفه سوم آشفتگی از روش های دیگر برای تعیین میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان استفاده کرده است، اما استفاده از این روش را برای تعیین میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان و کمی کردن آن نسبت به روش های دیگر ارجح دانسته و استفاده از این روش و روش های مشابه را برای دستیابی به جزئیاتی بیشتر از میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان توصیه می کند.

بارنجی و همکاران (2007) روش باری سنتریک را برای تعیین میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان ارایه کردند. بر مبنای این روش محدوده تغییرات ایزوتروپیک بودن یا غیر ایزوتروپیک بودن آشفتگی هر نقطه می تواند در یک مثلث قرار گرفته که نزدیک بودن به هر کدام از رئوس مثلث و نیز نزدیکی به اضلاع مثلث، نوع و میزان غیر ایزوتروپیک بودن را تعیین می کند. رادنکوویچ و همکاران (2014) برای تعیین میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان چرخشی از این روش استفاده کرده اند.

آبشکن ها یکی از سازه های مهم در ساماندهی رودخانه ها می باشند. استفاده از این نوع سازه ها در سواحل رودخانه ها موجب انحراف جریان نزدیک شونده به ساحل به سمت ساحل مقابل می شود که با توجه به اندرکنش جریان نزدیک شونده به ساحل با آبشکن در اطراف آبشکن ها حفره های آبشستگی ایجاد خواهد شد که می تواند محل مناسبی برای رشد و تکثیر آبزیان باشد.

مطالعات بسیاری در مورد تأثیر پارامترهای مختلف بر ابعاد حفره آبشستگی در اطراف آبشکن ها انجام شده است که از

دانه‌بندی تقریباً یکنواخت (انحراف معیار 1/3) پوشانده شد. برای جلوگیری از انتقال رسوبات در طول کانال و برای انجام آزمایش‌ها در شرایط بستر صلب، سطح رسوبات بوسیله دوغاب سیمان تثبیت شد. شرایط جریان درون کانال در جدول 1 ارائه شده است.

در این جدول u سرعت متوسط جریان در کانال بالادست، u_c سرعت متوسط جریان در شرایط حرکت رسوبات، Y عمق جریان در کانال بالادست، d_{50} قطر متوسط رسوبات، L طول جان آبشکن، l طول بال آبشکن و α زاویه قرارگیری آبشکن نسبت به ابتدای قوس می‌باشد. آبشکن‌ها از جنس پلکسی گلاس و با ضخامت 1 cm ساخته و در زاویه 45° درجه از ابتدای قوس نصب شدند. برای اندازه‌گیری عمق جریان و عمق آبشستگی عمق‌سنج دیجیتالی با خطای 0/1 میلی‌متر استفاده شد. دبی جریان نیز با استفاده از اریفیس کالیبره شده اندازه‌گیری شد. برای تعیین سرعت آستانه حرکت رسوبات از رابطه نیل (1973) استفاده گردید. این روش توسط بسیاری از محققان از جمله واقفی (1389) و خسروی (1390) برای تعیین سرعت آستانه حرکت رسوبات استفاده شده است و نتایج خوبی داشته است. آبشکن تیغه‌ای مورد استفاده در این تحقیق در شرایط غیر مستغرق بوده، اما آبشکن T شکل مورد استفاده در این تحقیق مستغرق (با درصد استغراق 5%) بود.

برای برداشت سرعت‌های لحظه‌ای از دستگاه سرعت‌سنج سه بعدی صوتی ADV استفاده شد. پلان و مقطع نقاط برداشت شده سرعت در شکل 1 ارائه شده است.

به دلیل تغییرات بیشتر شرایط جریان در اطراف آبشکن شبکه‌بندی در نزدیک آبشکن‌ها ریزتر شد. با توجه به اینکه افزایش فرکانس اندازه‌گیری سرعت‌های لحظه‌ای موجب افزایش میزان نویزهای ورودی به سری زمانی می‌شود، فرکانس برداشت داده‌ها مطابق تحقیقات قبلی از جمله دی و بارباهویا (2006) برای جریان اطراف کوله‌های پل، 50 HZ در نظر گرفته شد.

جدول 1 شرایط مربوط به انجام آزمایش‌ها

خصوصیات آبشکن	α°	L	l	d_{50}	Y	u_c	u
تیغه‌ای و T شکل	45	9	9	1/28	0/118	0/356	0/35

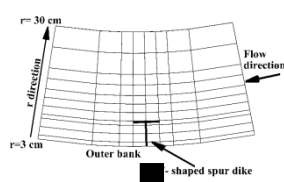
مدل‌های آشفتگی که بر مبنای ایزوتروپیک بودن آشفتگی ارائه شده‌اند، ضروری است. روش‌های مختلفی برای تعیین میزان کیفی شرایط غیر ایزوتروپیک جریان مانند مقایسه پارامترهای آشفتگی یا تانسورهای تنش‌های رینولدز و یا استفاده از طیف‌های انرژی مؤلفه‌های مختلف سرعت جریان وجود دارد. در هیچ کدام از این روش‌ها نمی‌توان میزان غیر ایزوتروپیک بودن نقاط مختلف را با یکدیگر مقایسه کرد؛ به عبارت دیگر کمی‌سازی میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان توسط این روش‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد از این رو استفاده از روش‌های ارائه شده توسط لاملی (1977) بارنجی و همکاران (2007) برای تعیین میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان اطراف آبشکن اجتناب‌ناپذیر است. با توجه به کمبودهای موجود درباره شرایط غیر ایزوتروپیک اطراف آبشکن‌ها و نیز ضرورت انجام تحقیق درباره آن، در مقاله حاضر با توجه به روش‌های مختلف (که خلاصه‌ای از آنها در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود) از جمله نقشه‌های ثابت غیر ایزوتروپیک، میزان غیر ایزوتروپیک بودن در نواحی مختلف جریان عبوری از اطراف آبشکن‌های T شکل و تیغه‌ای بررسی می‌شود و مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف برای تعیین میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان عبوری اطراف آبشکن‌ها انجام می‌شود.

2- تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه دانشگاه تربیت مدرس در کانالی با قوس 90° انجام شد. ارتفاع و عرض کانال به ترتیب 0/7 m و 0/6 m بود. کانال از سه بخش متفاوت تشکیل شده بود که همراه با مخازن قرار گرفته در بالادست و پایین‌دست کانال، تشکیل دهنده کانال بودند. مخزن بالادست توسط کانالی مستقیم بطول 7/2 m به قوسی با شعاع 1/2 m متصل شده و انتهای قوس به کانال مستقیم دیگر بطول تقریبی 5/1 m متصل شد. در انتهای کانال دریچه‌ای پروانه‌ای قرار داشت که از آن برای تنظیم عمق جریان درون کانال استفاده شد. کانال مورد استفاده منشوری و با سطح مقطع مستطیلی بود. بستر کانال تا ارتفاع 0/3m با رسوبات بقطر میانگین 1/28mm و با



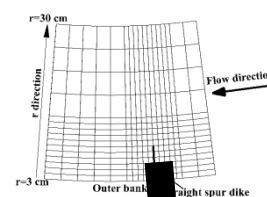
د- مقطع آبشکن T شکل



ج- پلان آبشکن T شکل



ب- مقطع آبشکن تیغه‌ای



الف- پلان آبشکن تیغه‌ای

شکل 1 نمایی از محدوده برداشت سرعت و نقاطی که در آنها سرعت برداشت شده است

منفی سرعت شعاعی و عمقی در نزدیک نوک آبشکن مربوط به جریان پایین رونده و وجود جریان شعاعی و عمقی مثبت نشان دهنده جریان بالا رونده به سمت ساحل خارجی می‌باشد. مجموع این دو نشان دهنده و تأیید کننده تشکیل جریان گردابه نعل اسبی در این ناحیه می‌باشد. لازم به یادآوری است که در همین مقطع (مقطع شماره 8) و در مقطع پایین دست (مقطع شماره 12) در تراز میانی جریان مقادیر مثبت سرعت شعاعی در فاصله دور از آبشکن و نیز دور از جریان برگشتی تشکیل شده در پایین دست، به علت تأثیرات جریان ثانویه در قوس می‌باشد. شکل 2- د نشان دهنده تغییرات مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی در دو تراز و دو مقطع (مقطع قرارگیری آبشکن یا مقطع 8 و مقطع پایین دست آبشکن یا مقطع 12) برای جریان عبوری از اطراف آبشکن تیغه‌ای می‌باشد. دو فرایند متفاوت در تراز نزدیک بستر و تراز میانی جریان مشاهده می‌شود. در مقطع 8 در تراز نزدیک بستر یک پیک در نزدیکی آبشکن مشاهده می‌شود، در حالی که در لایه‌های میانی این پیک از بین رفته و مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی در فواصل مختلف تا آبشکن تغییر زیادی نمی‌کند. اما در مقطع پایین دست آبشکن تعداد پیک‌ها در نزدیک بستر در دو منطقه مشاهده شده، در حالی که در تراز میانی جریان یک پیک مشاهده می‌شود.

در مقطع قرارگیری آبشکن تشکیل گردابه نعل اسبی در نزدیک بستر موجب افزایش مقدار انرژی جنبشی آشفتگی در نزدیک دماغه آبشکن می‌شود، در حالی که در ترازهای بالایی جریان و با حذف این گردابه روندی یکنواخت در مقدار انرژی جنبشی آشفتگی مشاهده می‌شود. در مقطع پایین دست آبشکن و در نزدیک بستر علاوه بر وجود یک پیک در ناحیه دور از آبشکن که مربوط به گردابه نعل

مدت زمان اندازه‌گیری سرعت در هر نقطه بر مبنای آنالیز پایداری تعیین شد. برای آنالیز پایداری از همبستگی‌های درجه 2 و 3 که پارامترهای پایه‌ای در بررسی میزان غیر ایزوتروپیک بودن جریان هستند، استفاده شد و مدت زمان کافی برای اندازه‌گیری سرعت‌ها در هر نقطه از 3 تا 5 دقیقه در نقاط مختلف بدست آمد. پس از اندازه‌گیری سرعت‌های لحظه‌ای در سری زمانی و برای حذف اسپایک‌های موجود در سری زمانی از روش ارایه شده توسط گورینگ و نیکورا (2002) استفاده شد. پس از حذف اسپایک‌های موجود در سری زمانی حداقل تعداد سرعت‌های لحظه‌ای موجود در تمام نقاط مورد بررسی بیشتر از 3000 عدد بوده که بسیار بیشتر از حداقل ارایه شده توسط یاگر (2009) (1000 داده) می‌باشد.

3- نتایج و بحث

3-1- سرعت‌های متوسط و انرژی جنبشی آشفتگی

شکل‌های 2- الف تا ج نشان دهنده تغییرات سرعت در سه راستا (مماسی θ ، شعاعی r و عمقی z) در لایه‌های مختلف در محل قرارگیری آبشکن و در مقطع پایین دست آبشکن می‌باشد.

در ناحیه نزدیک بستر مقادیر کوچکتر سرعت مماسی در نزدیک بستر نسبت به ترازهای میانی به دلیل وجود مرز جامد بوده، حال آنکه در ترازهای بالایی مقدار سرعت شعاعی افزایش می‌یابد. وجود ناحیه جریان چرخشی در پایین دست آبشکن موجب منفی شدن این مقادیر تا فاصله 10 cm از دیواره خارجی کانال می‌شود.

تحلیل هم‌زمان سرعت‌های شعاعی و عمقی در نزدیک نوک آبشکن نشان دهنده وجود یک جریان پایین رونده و بالارونده در این ناحیه می‌باشد که وجود هر دو مقدار

در مرز بین جریان برگشتی در پایین دست و جریان عبوری از اطراف آبشکن) می باشد. در همین مقطع در لایه بالایی جریان تنها یک پیک مربوط به لایه برشی مشاهده می شود و با حذف گردابه نعل اسبی پیکی در این ناحیه مشاهده نمی شود. لازم به ذکر است برای تعیین شکل و ابعاد گردابه نعل اسبی تشکیل شده در اطراف آبشکن نیاز به شبکه بندی ریز در اطراف آبشکن می باشد.

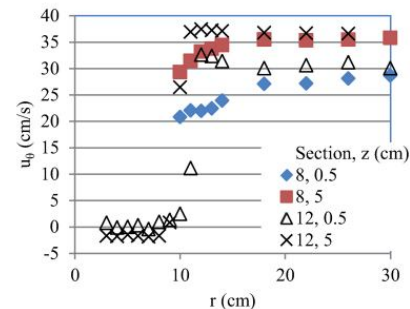
3-2- تعیین میزان غیر ایزوتروپی با روش های مختلف

شناخت آشفتگی جریان وابسته به داشتن اطلاعاتی از میزان غیر ایزوتروپ بودن جریان می باشد. ابتدا برای تعیین میزان غیر ایزوتروپ بودن جریان در هر نقطه، تانسور تنش های وارد بر هر المان مورد نظر در جریان، که درایه های آن تنش های رینولدز برشی و عمودی در المان مورد نظر می باشد، ایجاد می شود. تانسور تنش های وارد بر هر المان را می توان به دو بخش تقسیم کرد: تانسور اول که تانسور ایزوتروپی یا تانسور کروی بوده و تانسور دوم که تانسور انحرافی بوده و از حاصل تفریق ماتریس کروی از ماتریس تنش های رینولدز بدست می آید. بر این مبنا درایه های ماتریس انحرافی b_{ik} به صورت تفاوت بین نسبت درایه های تانسور تنش های رینولدز به ترم انرژی جنبشی آشفتگی و تانسور کروی از رابطه (1) که توسط لاملی و نیومان (1977) ارائه شد بدست می آید.

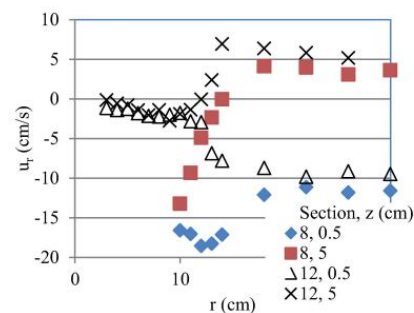
$$b_{ik} = \frac{\overline{u'_i u'_k}}{2k} - \frac{\delta_{ik}}{3} \quad (1)$$

در این رابطه k انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) بوده و δ_{ik} دلتای کرونکر می باشد. لازم به ذکر است که تانسور انحرافی بدست آمده تانسوری متقارن و با تریس (مجموع درایه های قرار گرفته بر روی قطر ماتریس) صفر می باشد. طبق نظر لاملی (1978) برای تعیین میزان کلی غیر ایزوتروپ بودن جریان، لازم است از دو ثابت، یکی ثابت دوم غیر ایزوتروپی ($II = -b_{ik}b_{ik}/2$) و دیگری ثابت سوم غیر ایزوتروپی ($III = b_{ij}b_{jk}b_{ki}/3$) استفاده شود. لازم به ذکر است که در محاسبات ثابت اول غیر ایزوتروپی ($I = b_{ii} = 0$) می باشد. اگر نمودار II در مقابل III رسم شود، حاصل آن با عنوان "نقشه ثابت غیر ایزوتروپی" شناخته می شود. در

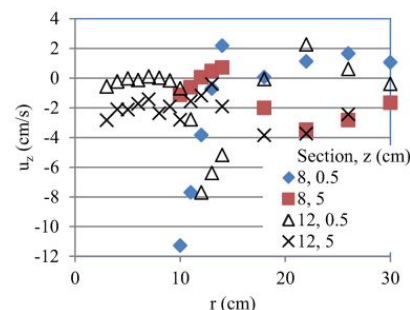
اسبی است، در مرز بین جریان عبوری از اطراف آبشکن و جریان برگشتی در پایین دست آبشکن نیز یک پیک در انرژی آشفتگی وجود دارد که دقیقاً در ناحیه لایه برشی



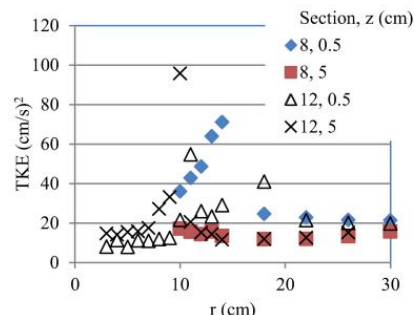
الف - سرعت مماسی



ب- سرعت شعاعی



ج- سرعت عمقی



د- انرژی جنبشی آشفتگی

شکل 2 مقادیر مختلف مؤلفه های سرعت و انرژی جنبشی آشفتگی در دو تراز و در دو مقطع برای آبشکن تیغه ای

پارامترهای II , III در مقاطع مختلف برای آبشکن تیغه‌ای می‌باشد. چنانچه ملاحظه می‌شود در مقطع بالادست آبشکن و در نزدیک بستر مقادیر III بسیار کم بوده و مقادیر پارامتر II نسبتاً بزرگ است. چنین شرایطی نشان دهنده این است که در نزدیک بستر در این مقطع شرایط آشفته‌گی به شرایط آشفته‌گی دو مؤلفه‌ای نزدیک است. در نزدیک ساحل خارجی کاهش مقدار ثابت دوم غیر ایزوتروپی (II) نشان دهنده سه مؤلفه‌ای تر شدن ساختار آشفته‌گی در این ناحیه نسبت به مناطق میانه کانال می‌باشد.

در مقطع بالادست آبشکن و ترازهای بالای بستر مقادیر ثابت سوم غیر ایزوتروپی بیشتر می‌شود که نشان دهنده نزدیک شدن به شرایط آشفته‌گی دوسر تیز با تقارن محوری نسبت به ترازهای نزدیک بستر می‌باشد. در مقطع قرارگیری جان آبشکن و در فاصله دور از آبشکن روندی مشابه آنچه در مقطع بالادست اتفاق افتاد، مشاهده شد. در نواحی نزدیک آبشکن مقادیر ثابت سوم غیر ایزوتروپی (III) به جز در منطقه شکل‌گیری جریان گردابه نعل اسبی (گزارش شده توسط خسروی 1390) مقداری افزایش می‌یابد در حالی که مقادیر ثابت دوم غیر ایزوتروپی به جز در ناحیه جریان گردابه نعل اسبی که مقداری کاهش یافته، در سایر نقاط تغییر چندانی نکرد. بنابر این در منطقه گردابه نعل اسبی شرایط آشفته‌گی بیشتر به شرایط سه مؤلفه‌ای نزدیک می‌شود. در مقطع پایین دست آبشکن و در نقاط دور از لایه برشی شکل گرفته در اطراف آبشکن شرایط مانند آنچه در مقطع بالادست گزارش شد، می‌باشد.

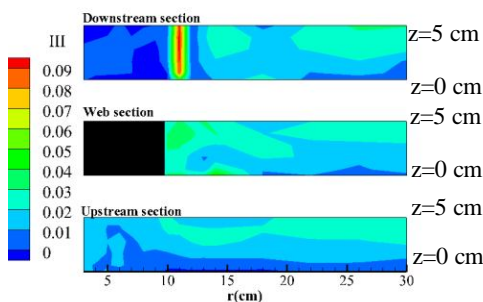
نقشه ثابت غیر ایزوتروپی II که یا مثبت است یا صفر، نشان دهنده میزان غیر ایزوتروپ بودن جریان و III نمایه‌ای برای تعیین طبیعت غیر ایزوتروپی جریان می‌باشد. برای تعیین حدود نقشه ثابت غیر ایزوتروپی از روابط (2) و (3) استفاده می‌شود (رادنکوویچ و همکاران 2014).

$$II = 1.5 \left(\frac{4}{3} |III| \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

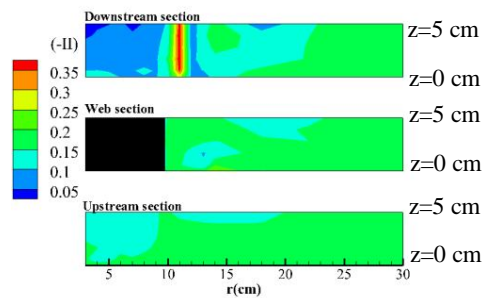
$$II = \frac{2}{9} + 2III \quad (3)$$

مرز مشخص شده در رابطه (2) اگر در سمت چپ محور III قرار گیرد، نشان دهنده آشفته‌گی متقارن محوری "کلوچه‌ای شکل" بوده که در این شرایط و دقیقاً بر روی مرز، آشفته‌گی در یک جهت کمتر از دو جهت دیگری می‌باشد که با یکدیگر برابر بوده، اما اگر نقطه بررسی شده در سمت راست محور III قرار گیرد، نشان دهنده آشفته‌گی متقارن محوری و "سیگار شکل" (دو سر تیز) بوده که در آن آشفته‌گی در یک جهت بیشتر از دو جهت دیگری است که آشفته‌گی در آنها با یکدیگر برابر است. با توجه به حدود نقشه ثابت غیر ایزوتروپی، مختصات نقاط رئوس برای آشفته‌گی این نقشه به ترتیب برای آشفته‌گی یک مؤلفه‌ای دو مؤلفه‌ای $II=0/667$, $III=0/222$ و برای آشفته‌گی سه مؤلفه‌ای (ایزوتروپ) $I=II=III=0$ می‌باشد. برای تعیین میزان غیر ایزوتروپی جریان اطراف آبشکن‌ها ابتدا منحنی‌های هم‌تراز II و III در مقاطع مختلف ارائه می‌شود.

شکل‌های 3- الف و ب نشان دهنده منحنی‌های هم‌تراز



ب- III



الف - II

شکل 3 منحنی‌های هم‌تراز پارامترهای II و III در آبشکن تیغه‌ای

ثابت‌های درجه 2 و 3 همانند آبشکن تیغه‌ای بزرگ می‌باشند. برای داشتن دیدی کاملتر نسبت به شکل تانسورها در این نواحی در انتهای مقاله شکل تانسورها ارایه خواهد شد.

برای تعیین شرایط غیر ایزوتروپی جریان با استفاده از یک تابع، لاملی (1978) تابع غیر ایزوتروپی (J) را ارایه کرد (رابطه 4).

$$J = 1 - 4.5II + 9III \quad (4)$$

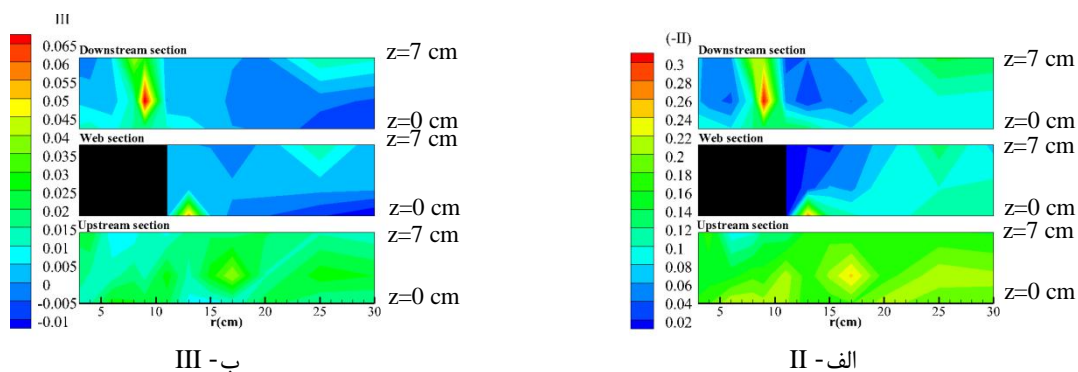
تابع J نشان دهنده فاصله از مرز شرایط دو مؤلفه‌ای آشفتگی و نزدیکی به شرایط سه مؤلفه‌ای آشفتگی می‌باشد. اگر $J=0$ باشد نشان دهنده آشفتگی دو مؤلفه‌ای جریان در آن ناحیه و اگر $J=1$ باشد، یعنی مقادیر ثابت‌های دوم و سوم غیر ایزوتروپی صفر بوده و بنابراین در آن نقطه شرایط آشفتگی ایزوتروپ (سه مؤلفه‌ای) وجود دارد.

شکل‌های 5- الف و ب نشان دهنده منحنی‌های هم‌تراز مقادیر تابع غیر ایزوتروپی برای سه مقطع در بالادست محل قرارگیری جان آبشکن و پایین‌دست آبشکن تیغه‌ای مورد بررسی می‌باشد.

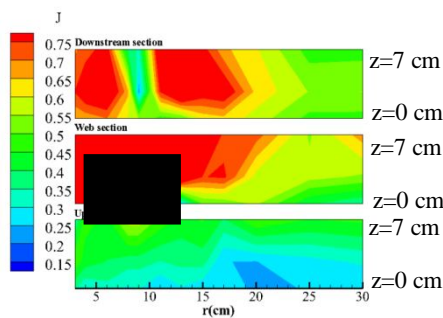
چنانچه ملاحظه می‌شود در بالادست آبشکن تیغه‌ای، آشفتگی در نزدیک بستر بیشتر شرایط دو مؤلفه‌ای را داشته، در حالی که در ترازهای بالاتر نسبت به نواحی نزدیک بستر شرایط آشفتگی جریان بیشتر به صورت سه مؤلفه‌ای می‌باشد که دلیل آن را می‌توان تأثیر بستر بر استهلاك آشفتگی در جهت عمقی دانست و در نتیجه میزان آشفتگی بیشتر به صورت سطحی و دو مؤلفه‌ای می‌باشد.

در منطقه جریان لایه برشی بیشترین فاصله از مبدا و شرایط ایزوتروپی جریان مشاهده می‌شود و مقادیر ثابت سوم غیر ایزوتروپی مقادیری مثبت می‌باشد. در نتیجه می‌توان انتظار داشت در این ناحیه نزدیک شدن به شرایط آشفتگی یک مؤلفه‌ای نسبت به سایر نقاط در نظر گرفته شده حاکم باشد و شرایط غیر ایزوتروپ بودن جریان در این ناحیه کاملاً حاکم گردد. در دو طرف لایه برشی تشکیل شده در اطراف آبشکن (در ناحیه جریان برگشتی و نیز در مرز لایه برشی و جریان عبوری از اطراف آبشکن شرایط آشفتگی جریان) ثابت‌های دوم و سوم غیر ایزوتروپی کوچک می‌شوند و برای تعیین شرایط آشفتگی در این مناطق نیاز است که شکل تانسورهای تنش تعیین شود.

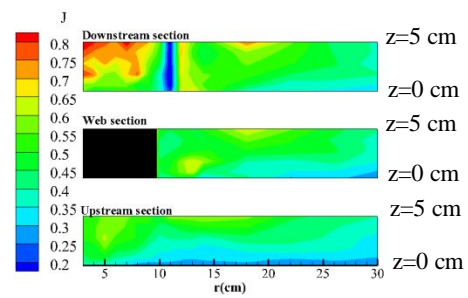
شکل‌های 4- الف و ب نشان دهنده منحنی‌های هم‌تراز ثابت‌های دوم و سوم غیر ایزوتروپی برای مقاطع مختلف در اطراف آبشکن T شکل می‌باشد. همانند آنچه برای آبشکن تیغه‌ای مشاهده شد در نزدیک بستر شرایط دو مؤلفه‌ای بودن آشفتگی بیشتر از ترازهای بالایی بوده، اما در نزدیک ساحل خارجی در مقطع بالادست نسبت به سایر نقاط قرار گرفته در این مقطع شرایط آشفتگی جریان بیشتر به شرایط سه مؤلفه‌ای نزدیک می‌شود. در محل قرارگیری جان آبشکن و در نزدیک آبشکن T شکل مقادیر ثابت دوم غیر ایزوتروپی کوچک شده و در همین منطقه ثابت سوم غیر ایزوتروپی نیز مقادیری کوچک دارند. در منطقه جریان برگشتی و در دو سمت لایه برشی شکل گرفته در اطراف آبشکن مقادیر ثابت غیر ایزوتروپی درجه 2 و 3 کوچک بوده، اما در لایه برشی مقادیر



شکل 4 منحنی‌های هم‌تراز ثابت‌های دوم و سوم غیر ایزوتروپی برای مقاطع مختلف آبشکن T شکل



شکل ب- برای آبشکن T شکل



الف- برای آبشکن تیغه‌ای

شکل 5 منحنی‌های هم‌تراز تغییرات تابع غیر ایزوتروپی در مقاطع مختلف

وسیعتری مشاهده می‌شود که در نتیجه ایجاد گردابه‌های جدا شده از نوک آبشکن تیغه‌ای می‌باشد. برای هر سه مقطع در نظر گرفته شده در ترازهای میانی و در میانه کانال ناحیه‌ای با شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای مشاهده می‌شود که این ناحیه در دو مقطع محل قرارگیری جان آبشکن و مقطع در نظر گرفته شده در پایین دست نسبت به مقطع بالادست بیشتر به میانه کانال نزدیک شده است. این ناحیه نشان دهنده مرکز جریان ثانویه می‌باشد که در مقطع قرارگیری جان آبشکن و در مقطع پایین دست به دلیل تأثیرات وجود آبشکن به سمت میانه کانال منتقل شده است.

در مورد آبشکن T شکل نیز در مقطع بالادست در نواحی نزدیک بستر شرایط جریان بیشتر به صورت آشفتگی دو مؤلفه‌ای بوده، در حالی که در ترازهای بالاتر شرایط آشفتگی بیشتر به صورت سه مؤلفه‌ای خواهد بود. در کنار ساحل خارجی نیز در نزدیک ترازهای نزدیک سطح آب شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای جریان مشاهده می‌شود که دلیل آن را می‌توان تشکیل جریان ثانویه دوم در این منطقه دانست. در مقطع پایین دست در دو سمت لایه برشی تشکیل شده در پایین دست آبشکن شرایط آشفتگی به شرایط سه مؤلفه‌ای حاکم نزدیک شده، اما در محل جریان لایه برشی شرایط آشفتگی جریان از شرایط سه مؤلفه‌ای فاصله می‌گیرد. در محل قرارگیری جان آبشکن T شکل مستغرق شرایط سه مؤلفه‌ای بودن آشفتگی تا محدوده بیشتری از عرض کانال نسبت به آبشکن تیغه‌ای در این مقطع توسعه پیدا کرده که دلیل آن را می‌توان توسعه بیشتر گردابه‌ها در مقطع عرضی در این نوع

در همین مقطع و در ناحیه نزدیک به دیواره خارجی آشفتگی جریان بیشتر به شرایط سه مؤلفه‌ای نزدیک شده و در نقاط نزدیک به میانه کانال آشفتگی بسمت دو مؤلفه‌ای شدن نسبت به مناطق نزدیک دیواره خارجی میل خواهد کرد. دلیل شرایط سه مؤلفه‌ای آشفتگی در نزدیک دیواره خارجی را می‌توان تشکیل جریان ثانویه دوم در این منطقه که توسط واقفی (1390) در جریان درون قوس گزارش شده، دانست که یکی از عوامل افزایش آشفتگی در جهت‌های مختلف در این منطقه می‌باشد.

در مقطع قرارگیری جان آبشکن تیغه‌ای در مناطق نزدیک نوک آبشکن و در منطقه جریان گردابه نعل اسبی شرایط آشفتگی جریان نسبت به نقاط دیگر در این مقطع بیشتر به شرایط سه مؤلفه‌ای نزدیک شده در حالی که در مناطق نزدیک میانه کانال شرایط آشفتگی جریان بیشتر به شرایط دو مؤلفه‌ای نزدیک می‌شود. بیشتر بودن شرایط سه مؤلفه‌ای آشفتگی در این ناحیه می‌تواند به دلیل وجود جریان برگشتی دوم در این ناحیه باشد. در مقطع پایین دست آبشکن و در محل جریان برگشتی، بزرگتر بودن مقادیر تابع غیر ایزوتروپیک نشان دهنده شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای بوده، در حالی که در محل جریان برشی کم شدن تابع غیر ایزوتروپیک دلیلی بر نزدیک شدن آشفتگی به شرایط دو مؤلفه‌ای در این ناحیه می‌باشد. در همین مقطع و در محل جریان عبوری از کنار لایه برشی، شرایط آشفتگی به شرایط سه مؤلفه‌ای نزدیکتر می‌شود. مطابق آنچه در شکل‌ها مشاهده می‌شود، محدوده آشفتگی سه مؤلفه‌ای در مقطع محل قرارگیری جان آبشکن و در مقطع پایین دست نسبت به مقطع بالادست در محدوده

برای تعیین شرایط آشفته‌گی در هر نقطه می‌توان از رابطه (6) استفاده کرد (Darko et al., 2014).

$$A_T = C_1 A_T^1 + C_2 A_T^2 + C_3 A_T^3, \quad C_1 + C_2 + C_3 = 1 \quad (6)$$

در این رابطه A_T^i ماتریس‌های مربوط به آشفته‌گی i (1 تا 3 مؤلفه) مؤلفه‌ای می‌باشند و C_i ضرایب تناسب هستند که بین صفر تا یک تغییر می‌کنند و مقادیر نزدیک به صفر آنها نشان دهنده این است که شرایط موجود دور از شرایط حدی بوده و مقدار 1 نشان دهنده شرایط حدی (آشفته‌گی یک مؤلفه‌ای، دو مؤلفه‌ای و سه مؤلفه‌ای) است. با استفاده از مقادیر اصلی می‌توان مقادیر ضرایب تناسب را تعیین کرد (روابط 7 تا 9) (Darko et al., 2014).

$$C_1 = \lambda_1 - \lambda_2 \quad (7)$$

$$C_2 = 2(\lambda_2 - \lambda_3) \quad (8)$$

$$C_3 = 3\lambda_3 + 1 \quad (9)$$

برای تعیین میزان انحراف از شرایط ایزوتروپیک نیز می‌توان از رابطه (10) استفاده کرد (Darko et al., 2014).

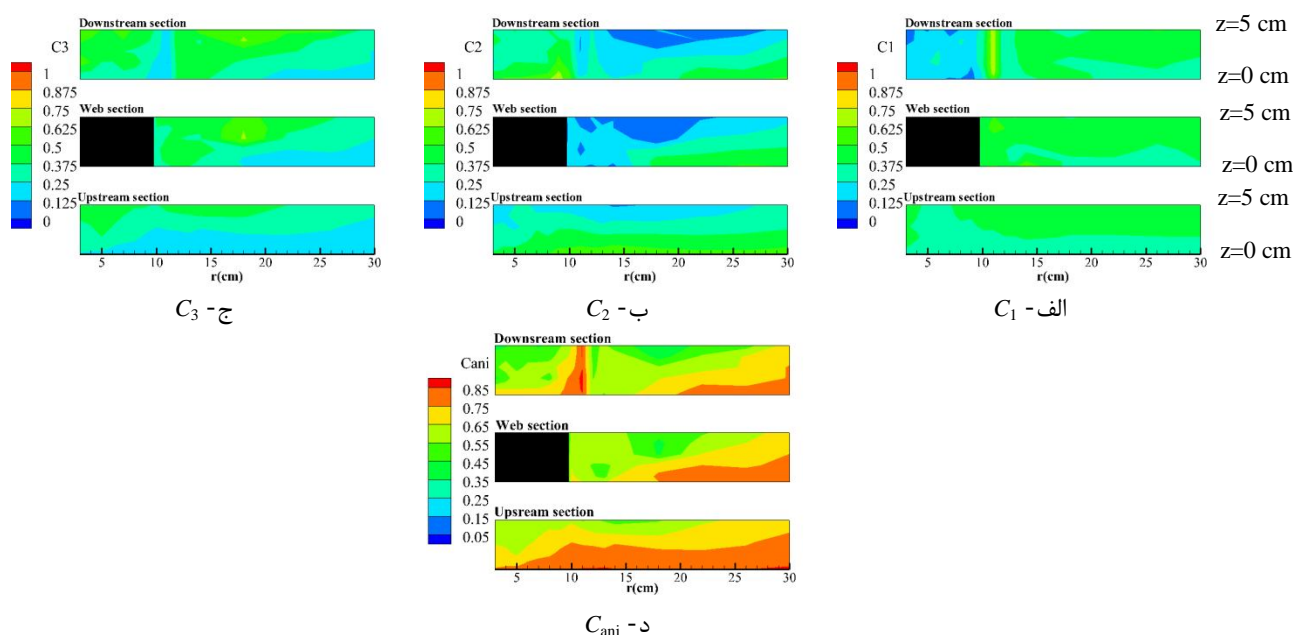
$$C_{ani} = C_1 + C_2 \quad (10)$$

در این رابطه C_{ani} نشان دهنده میزان غیر ایزوتروپ بودن جریان می‌باشد. شکل‌های 6- الف تا د نشان دهنده تغییرات منحنی‌های هم‌تراز ضرایب تناسب و نیز ثابت غیر ایزوتروپیک در روش BM برای مقاطع مختلف می‌باشد.

آبشکن‌ها به دلیل شکل‌گیری این گردابه‌ها از نوک بالادست آبشکن، انحراف بیشتر جریان از نوک آبشکن و نیز انتقال جریان روگذری از روی آبشکن به مقاطع میانی کانال (گزارش شده توسط خسروی 1390) در این نوع از آبشکن‌ها دانست. یکی از روش‌های دیگر کاربردی برای تعیین شرایط آشفته‌گی استفاده از "نقشه مرکزی باری" (BM) می‌باشد (بارنجی و همکاران 2007). بر مبنای این روش شرایط غیر ایزوتروپ بودن آشفته‌گی توابعی خطی از تنش‌های رینولدز می‌باشند. شرایط آشفته‌گی در این روش بر مبنای بازچینی ماتریس تنش‌های رینولدز می‌باشد (A_T). این ماتریس به صورت ماتریسی قطری بوده که درایه‌های قطر آن ریشه‌های رابطه (5) می‌باشند.

$$\lambda^3 - 0.5III\lambda - \frac{III}{3} = 0, \quad A_T = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

در این رابطه λ_i ریشه‌های رابطه و مقادیر ویژه ماتریس تانسورها می‌باشند. می‌توان ثابت کرد که $0/66 < \lambda_i < -0/33$ و بنابراین برای شرایط آشفته‌گی یک مؤلفه‌ای $\lambda_1 = 0/66$ و $\lambda_2 = \lambda_3 = -0/33$ برای شرایط آشفته‌گی دو مؤلفه‌ای $\lambda_1 = \lambda_2 = 0/167$ و $\lambda_3 = -0/33$ و برای شرایط آشفته‌گی سه مؤلفه‌ای $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = -0/33$ می‌باشد.



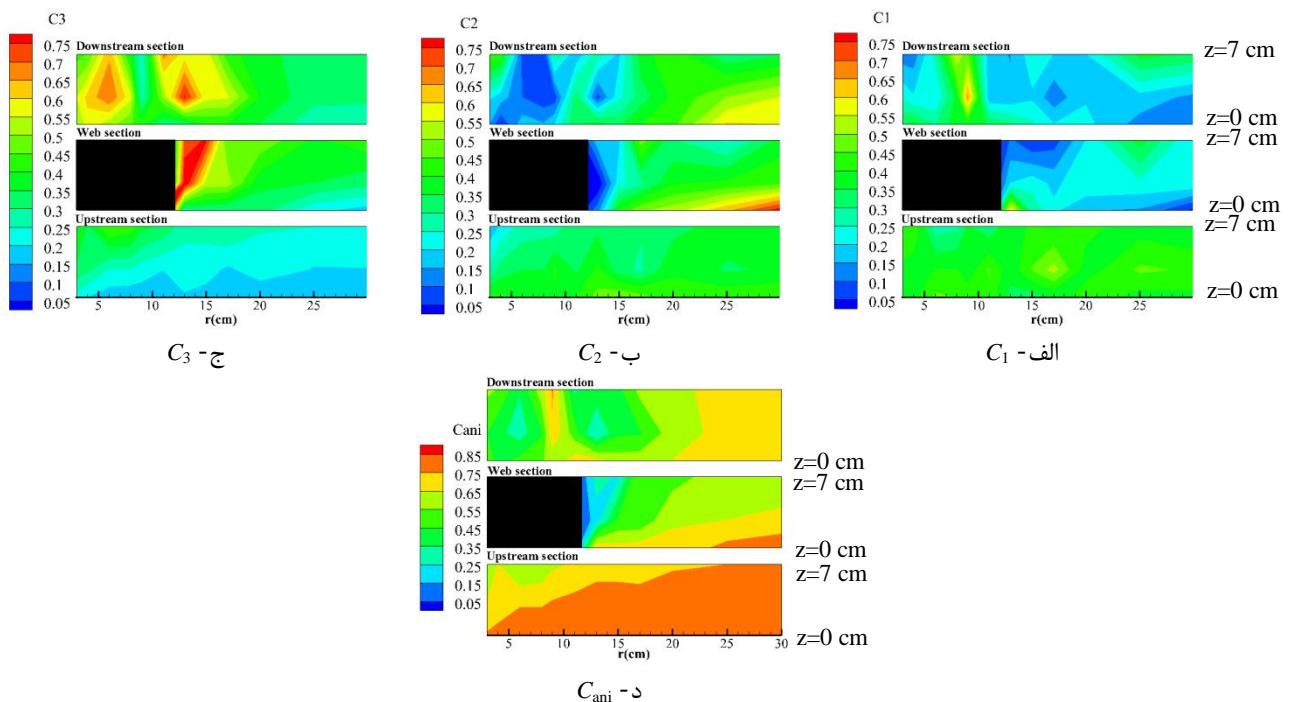
شکل 6 منحنی‌های هم‌تراز ضرایب تناسب در مقاطع مختلف برای آبشکن تیغه‌ای

مؤلفه‌های و تک مؤلفه‌ای میل می‌کند. در مرز جریان برشی و جریان عبوری از کنار ناحیه جریان چرخشی شرایط سه مؤلفه‌ای آشفتگی نسبت به شرایط آشفتگی دو مؤلفه‌ای و تک مؤلفه‌ای قوی‌تر می‌باشد. مطابق شکل 6- د نیز شرایط غیر ایزوتروپی بیشتر در لایه برشی و در ناحیه نزدیک بستر اتفاق می‌افتد و در نزدیک ترازهای میانی جریان، در نزدیک آبشکن در ناحیه جریان گردابه نعل اسبی شرایط آشفتگی بیشتر به شرایط سه مؤلفه‌ای نزدیک می‌شود.

شکل‌های 7- الف تا د نشان دهنده منحنی‌های هم‌تراز ضرایب تناسب و ضریب غیر ایزوتروپی برای مقاطع مختلف در اطراف آبشکن T شکل می‌باشد. چنانچه ملاحظه می‌شود، در مقطع بالادست آبشکن و در نزدیک بستر ضریب C_3 کمترین مقدار را داشته، در حالی که ضریب C_2 بیشترین مقدار را دارد. در نتیجه می‌توان گفت که شرایط آشفتگی جریان در این ناحیه بیشتر به سمت شرایط دو مؤلفه‌ای میل می‌کند، اما در ترازهای میانی جریان با حذف تأثیرات مستهلک کنندگی بستر بر آشفتگی در راستای عمقی، شرایط جریان بیشتر به صورت آشفتگی سه مؤلفه‌ای می‌باشد.

در نزدیک بستر افزایش ضریب C_2 در نزدیک بستر نشان دهنده افزایش شرایط آشفتگی دو مؤلفه‌ای در نزدیک بستر بوده در حالی که در ترازهای بالاتر افزایش ضرایب C_3 نشان دهنده افزایش شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای در نزدیک سطح آب می‌باشد.

در مقطع قرارگیری جان آبشکن و در نزدیک آبشکن شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای تقویت شده و ضریب C_3 در این ناحیه افزایش می‌یابد. در این مقطع و در نزدیکی جان آبشکن به دلیل اینکه رابطه درجه 3 ارایه شده دارای ریشه مضاعف می‌باشد، لذا مقدار C_2 در این ناحیه بشدت کاهش می‌یابد و بسمت صفر میل می‌کند و شرایط آشفتگی 2 مؤلفه‌ای در این ناحیه بشدت تضعیف می‌شود. در مقطع پایین دست آبشکن و در منطقه جریان برگشتی مقادیر C_2 و C_3 قابل مقایسه با یکدیگر هستند و شکل المان تنش در این ناحیه مشخص کننده شرایط آشفتگی جریان در این ناحیه می‌باشد. شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای جریان در ترازهای بالایی شکل گرفته، در حالی که در مناطق نزدیک بستر شرایط آشفتگی جریان بیشتر به شرایط آشفتگی دو مؤلفه‌ای نزدیک می‌شود. در همین مقطع و در ناحیه جریان لایه برشی شرایط جریان از شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای فاصله گرفته و به سمت شرایط آشفتگی دو



شکل 7 منحنی‌های هم‌تراز ضرایب تناسب در مقاطع مختلف برای آبشکن T شکل

آشفتگی دو مؤلفه‌ای در نزدیک بستر اتفاق می‌افتد و بیشترین فاصله تا رئوس مثلث مربوط به شرایط یک مؤلفه‌ای جریان می‌باشد و در نتیجه می‌توان انتظار داشت که شرایط آشفتگی در این مقطع در نزدیک بستر بیشتر به شرایط دو مؤلفه‌ای، سه مؤلفه‌ای و کمتر به شرایط تک مؤلفه‌ای نزدیک شود.

در ترازهای میانی جریان در این مقطع، کمترین فاصله مربوط به شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای جریان بوده و نشان می‌دهد که در ترازهای میانی شرایط آشفتگی در هر سه جهت بوده و نسبت به نواحی نزدیک بستر بیشتر به شرایط ایزوتروپیک نزدیک می‌شود. در مقطع قرارگیری آبشکن و در نزدیک آبشکن کمترین فاصله نقاط تا راس بالایی مثلث BM بوده و در نتیجه در این مقطع بیشترین تمایل جریان برای شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای می‌باشد و در نزدیک آبشکن این شرایط محسوستر می‌باشد.

در مقطع پایین‌دست آبشکن و در محل تشکیل جریان چرخشی پایین‌دست شرایط سه مؤلفه‌ای جریان به دلیل فاصله کم نقاط تا راس بالایی مثلث BM کاملاً مشهود بوده که در نزدیک بستر به شرایط آشفتگی دو مؤلفه‌ای نزدیک خواهد شد. در لایه برشی تشکیل شده در پایین-دست، فاصله نقاط از نقطه 1 در مثلث BM کمتر بوده، در نتیجه می‌توان انتظار داشت در این ناحیه شرایط آشفتگی جریان بیشتر به شرایط آشفتگی تک مؤلفه‌ای نزدیک باشد. در شکل‌های 10- الف تا ج منحنی‌های هم‌تراز فواصل نقاط در مثلث BM تا رئوس مثلث (نقاط 1، 2 و 3) برای آبشکن T شکل نمایش داده شده است. در بالادست آبشکن و در نزدیک دیواره خارجی شرایط سه مؤلفه‌ای بودن آشفتگی به دلیل فاصله کم تا نقطه 3 کاملاً مشهود بوده، در حالی که با فاصله گرفتن از ساحل خارجی این شرایط تضعیف می‌شود و فواصل نقاط مورد بررسی تا نقطه 3 افزایش می‌یابد. در مقطع قرارگیری جان آبشکن و در نزدیک آبشکن شرایط نزدیک شدن به شرایط سه مؤلفه‌ای آشفتگی کاملاً محسوس بوده و با افزایش فاصله از آبشکن این شرایط تضعیف می‌شود. در مقطع پایین-دست در نظر گرفته شده نیز در لایه برشی شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای ضعیف بوده و آشفتگی بیشتر به صورت دو مؤلفه‌ای و تک مؤلفه‌ای مشاهده می‌شود، اما

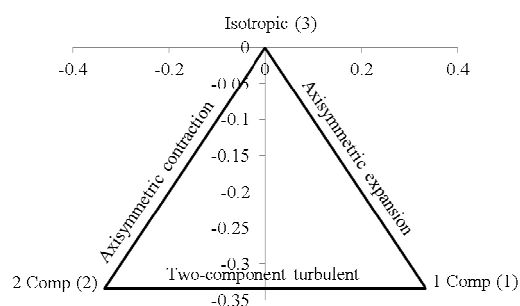
در این مقطع شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای در ساحل خارجی و در ترازهای میانی بیشترین مقدار را دارد. روند یکسانی از شرایط غیر ایزوتروپی در اطراف آبشکن T شکل و تیغه‌ای مشاهده می‌شود (شکل 7- د). در مقطع قرارگیری جان آبشکن شرایط سه مؤلفه‌ای جریان در نزدیک آبشکن وجود داشته و با افزایش فاصله از آبشکن شرایط سه مؤلفه‌ای بودن آشفتگی تضعیف می‌شود. در نزدیک بستر و در فاصله دور از آبشکن شرایط جریان در نزدیک بستر بشدت دو مؤلفه‌ای می‌باشد. در مقطع پایین-دست در لایه برشی شرایط آشفتگی جریان بشدت تک مؤلفه‌ای می‌باشد.

برای رسم نقشه باری سنتریک (BM) ابتدا مختصات رئوس مثلث بوسیله ماتریس‌های پایه A^1_T, A^2_T, A^3_T با مختصات $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ تعیین شده و مختصات سایر نقاط از روابط (11 و 12) برای تأمین رابطه (5) تعیین می‌شوند (Darko et al., 2014).

$$xm = C_1x_1 + C_2x_2 + C_3x_3 \quad (11)$$

$$yn = C_1y_1 + C_2y_2 + C_3y_3 \quad (12)$$

شکل شماتیک BM برای هر نقطه دلخواه به صورت شکل 8 می‌باشد (Baranje et al., 2007) و آشفتگی در هر نقطه دلخواه در مثلث شکل گرفته به نسبت اینکه به کدام راس و ضلع نزدیک باشد، می‌تواند بررسی شود.

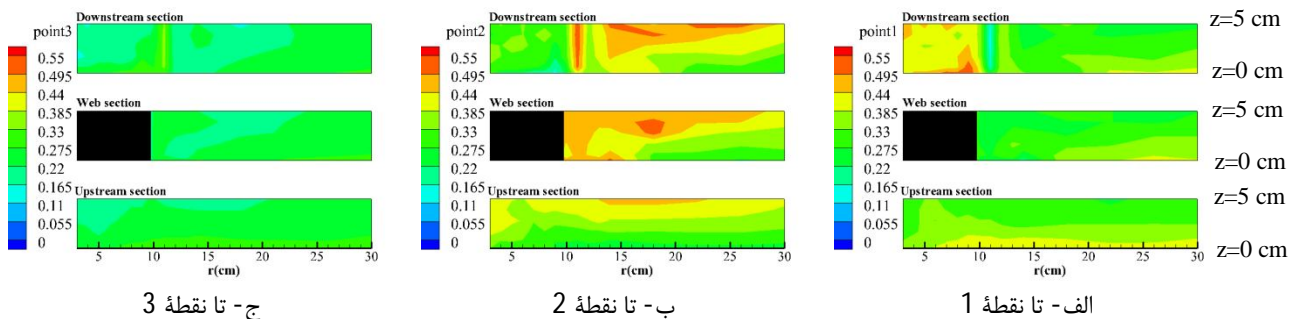


شکل 8 شکل شماتیک BM برای هر نقطه (Baranje et al., 2007)

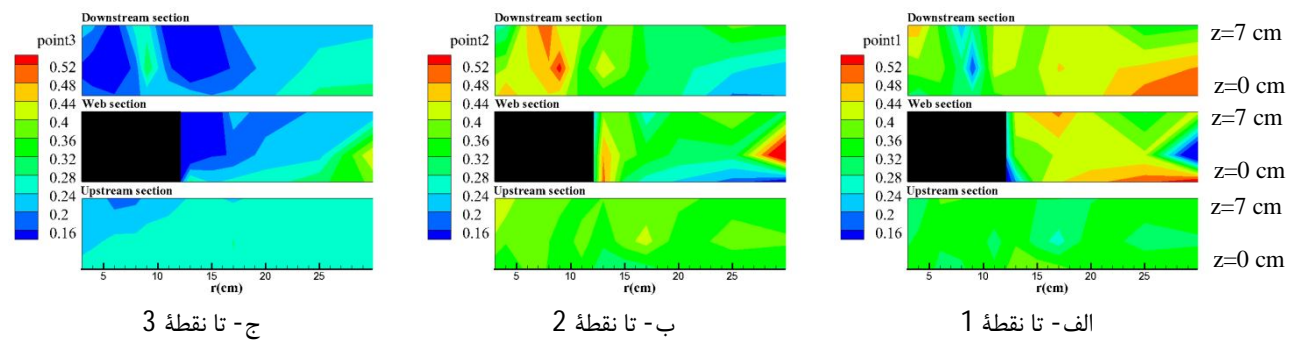
شکل‌های 9- الف تا ج نشان دهنده منحنی‌های هم‌تراز فواصل نقاط (x_m, y_n) تا رئوس مثلث (BM) برای سه مقطع در بالادست، محل قرارگیری جان آبشکن و در پایین‌دست آبشکن تیغه‌ای می‌باشد. در مقطع بالادست آبشکن تیغه‌ای و در نزدیک بستر، کمترین فاصله تا نقطه 2 و شرایط

جریان از شرایط دو مؤلفه‌ای بودن فاصله می‌گیرد. شکل‌های 11- الف تا ج نشان دهنده منحنی‌های هم‌تراز از فواصل نقاط تا اضلاع مثلث BM برای مقاطع مختلف از آبشکن تیغه‌ای می‌باشند. در مقطع بالادست و در نزدیک بستر کمترین فاصله از خط 12 می‌باشد که نشان دهنده شرایط دو مؤلفه‌ای آشفتگی است. در این ناحیه کمتر بودن فاصله نسبت به خط 23 در مقایسه با فاصله از خط 13 نشان دهنده انقباض دو مؤلفه‌ای آشفتگی و کمتر بودن یک مؤلفه از آشفتگی در مقایسه با دو مؤلفه دیگر که از نظر اندازه تا حدودی با یکدیگر برابر هستند، می‌باشد.

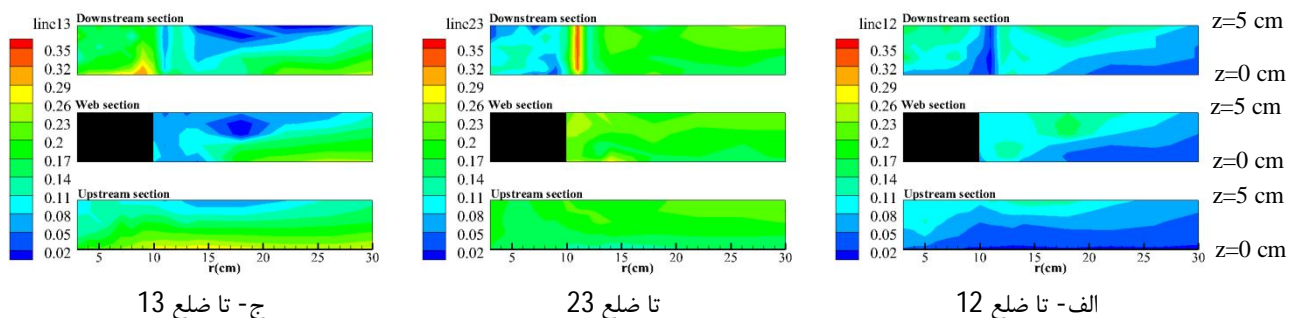
در منطقه جریان برگشتی تشکیل شده در پایین دست آبشکن و نیز در مرز لایه برشی و جریان عبوری از اطراف آبشکن شرایط سه مؤلفه‌ای بودن آشفتگی شدت می‌یابد که با دور شدن از لایه برشی از شرایط سه مؤلفه‌ای بودن آشفتگی کاسته شده و شرایط آشفتگی جریان به شرایط دو مؤلفه‌ای میل خواهد کرد و فاصله نقاط از نقطه 2 کاهش می‌یابد. در مقطع جان آبشکن و در نزدیک بال آبشکن همانند آبشکن تیغه‌ای بررسی شده، به دلیل داشتن ریشه مضاعف معادله درجه 3 فواصل از نقطه 2 به شدت افزایش می‌یابد و در این ناحیه شرایط آشفتگی



شکل 9 منحنی‌های هم‌تراز فواصل تا رئوس BM برای آبشکن تیغه‌ای در مقاطع مختلف



شکل 10 منحنی‌های هم‌تراز فواصل تا رئوس BM برای آبشکن T شکل در مقاطع مختلف



شکل 11 منحنی‌های هم‌تراز فواصل تا اضلاع مثلث BM برای آبشکن تیغه‌ای

خطوط 13 و 23 نشان دهنده سه مؤلفه‌ای شدن شرایط آشفتگی در این ناحیه است. شکل‌های 12- الف تا ج نمایش دهنده منحنی‌های هم‌تراز فواصل نقاط تا اضلاع مثلث BM برای مقاطع مختلف در اطراف آبشکن T شکل می‌باشد.

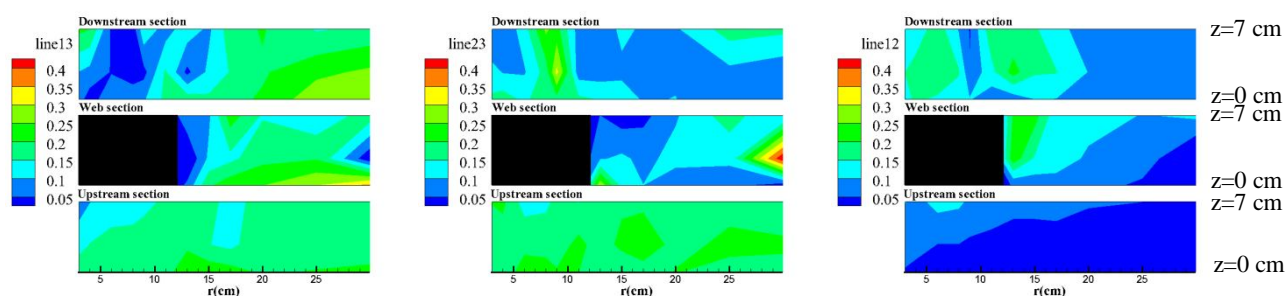
در مقطع بالادست آبشکن و در نزدیک بستر کمتر بودن فواصل نقاط تا خط 12 نشان دهنده دو مؤلفه‌ای بودن شرایط آشفتگی بوده، در حالی که در نواحی نزدیک بستر بخصوص در نواحی نزدیک به ساحل خارجی شرایط جریان از شرایط دو مؤلفه‌ای فاصله گرفته و با نزدیک شدن به خط 23 و 13 شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای بیشتر نمایان می‌شود. شرایط سه مؤلفه‌ای آشفتگی همانند آبشکن تیغه‌ای در مقطع قرارگیری جان آبشکن و در نزدیک آبشکن و نیز در مقطع پایین‌دست در محدوده جریان برگشتی و مرز بین لایه برشی و جریان عبوری از آبشکن نیز حاکم می‌باشد، چرا که در این نواحی نیز منحنی‌های هم‌تراز، نشان دهنده کمی فواصل از خطوط 13 و 23 می‌باشند. در لایه برشی شکل گرفته در اطراف آبشکن T شکل نیز فاصله نقاط از خط 23 افزایش داشته و به خطوط 13 و 12 نزدیک می‌شوند که نشان دهنده نزدیک شدن به شرایط آشفتگی یک مؤلفه‌ای است.

3-3- تعیین شکل تانسورهای تنش

مشاهده شکل تانسور تنش باعث افزایش میزان دانسته‌ها در مورد ساختار آشفتگی جریان می‌شود. رابطه‌ای که می‌تواند شکل تانسور تنش‌های رینولدز را مشخص کند، رابطه بیضی‌گون می‌باشد (رابطه 13).

در نزدیکی میانه عمق جریان روندها متفاوت بوده و انبساط آشفتگی که در نتیجه بیشتر بودن یک مؤلفه از آشفتگی در مقایسه با دو مؤلفه تقریباً برابر می‌باشد، اتفاق می‌افتد.

لازم به ذکر است که در ناحیه نزدیک سطح آب نزدیک بودن نقاط به نقطه 3 نشان دهنده قابل مقایسه بودن آشفتگی در هر سه راستا می‌باشد. در مقطع قرارگیری جان آبشکن و در نزدیک آبشکن، نزدیک بودن نقاط به خط 13 نشان دهنده انبساط آشفتگی می‌باشد، در حالی که با دور شدن از آبشکن نزدیک شدن به خط 12 نشان دهنده نزدیک شدن به شرایط دو مؤلفه‌ای بودن آشفتگی می‌باشد. در مقطع پایین‌دست آبشکن و در ناحیه جریان برگشتی در ترازهای میانی جریان نزدیکی به خط 23 نشان دهنده انقباض المان در این ناحیه بوده، اما در ترازهای نزدیک بستر افزایش فاصله تا خط 13 و نزدیکی به خطوط 12 و 23 نشان دهنده نزدیک شدن به شرایط دو مؤلفه‌ای آشفتگی در نزدیک بستر است. در ناحیه لایه برشی تشکیل شده در اطراف آبشکن بیشترین فاصله از خط 23 می‌باشد و کمترین فاصله از خطوط 13 و 12 می‌باشد که نشان دهنده نزدیک بودن آشفتگی به شرایط یک مؤلفه‌ای می‌باشد. در مرز بین لایه برشی شکل گرفته و جریان عبوری از اطراف آبشکن، فاصله نقاط از اضلاع 23 کاهش یافته که نشان دهنده انبساط المان تانسور تنش در این ناحیه می‌باشد. در فاصله دور از لایه برشی در این مقطع و در نزدیک تراز میانی فاصله از ضلع 12 کاهش یافته که نشان دهنده شرایط دو مؤلفه‌ای آشفتگی جریان می‌باشد. در ترازهای میانی جریان فواصل کمتر نقاط تا



ج- تا ضلع 13

ب- تا ضلع 23

الف- تا ضلع 12

شکل 12 منحنی‌های هم‌تراز فواصل تا اضلاع مثلث BM برای آبشکن T شکل

بستر، 2 در تراز میانی جریان) برای مقایسه بین شرایط آشفته‌گی در ترازهای مختلف، در نزدیک آبشکن و در محل تشکیل جریان گردابه نعل اسبی (نقطه 3)، در لایه برشی شکل گرفته در پایین دست آبشکن (نقطه 4) و در جریان چرخشی شکل گرفته در پایین دست آبشکن (نقطه در تراز میانی جریان) می‌باشند.

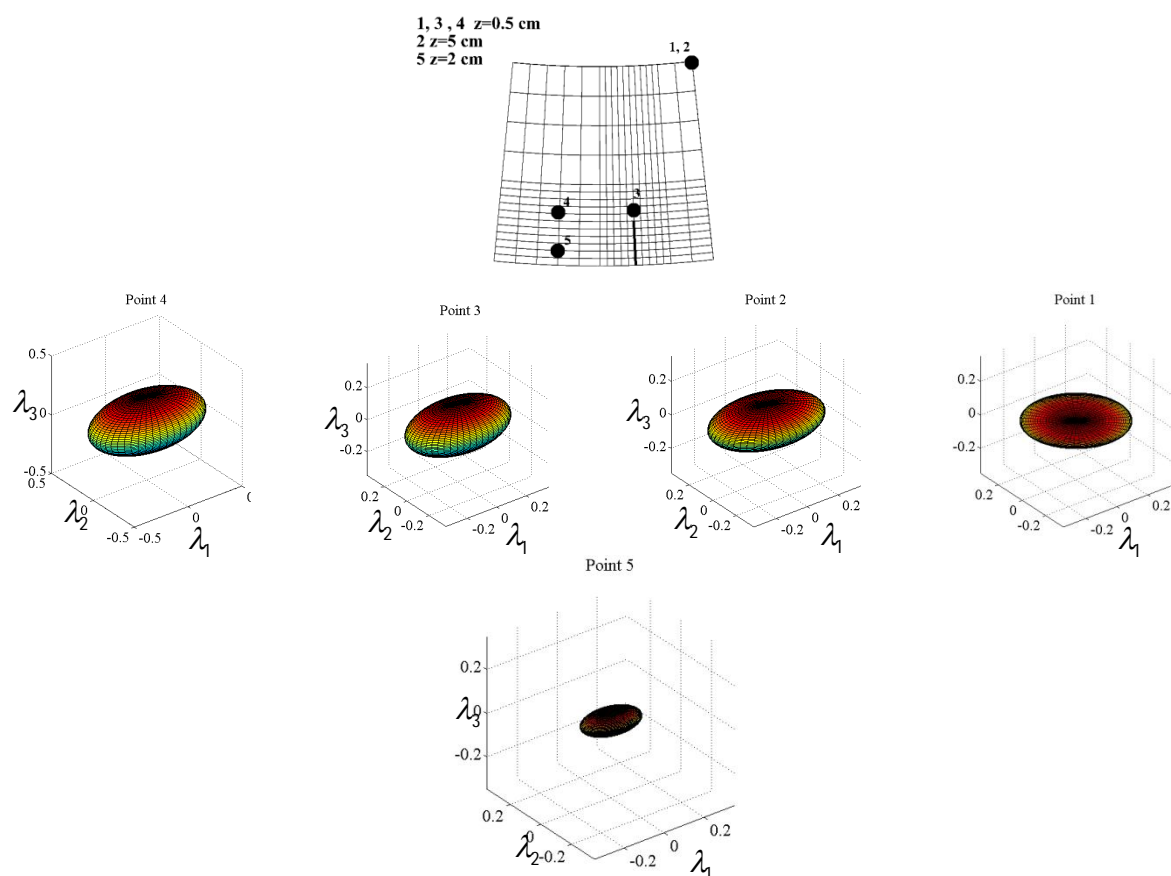
مقایسه بین شکل‌های تانسور المان‌های موجود در نقاط 1 و 2 نشان می‌دهد که در نقطه 1 شکل بیضی تشکیل شده و نسبت به نقطه 2 پخته‌تر می‌باشد. مقایسه بین مقادیر اصلی در این دو نقطه نیز نشان می‌دهد که در نقطه 1 یکی از مقادیر اصلی تانسور غیرایزوتروپی نزدیک به صفر بوده و قدرمطلق دو مقدار اصلی دیگر در این نقطه 0/289 بوده و با یکدیگر برابر است، بنابراین در این نقطه شکل المان تانسور تقریباً دیسکی شکل می‌باشد.

محورهای اصلی بیضی‌گون منطبق بر مقادیر ویژه تانسور غیر ایزوتروپی می‌باشد (Darko et al., 2014).

$$\left(\frac{x}{\lambda_1}\right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda_2}\right)^2 + \left(\frac{z}{\lambda_3}\right)^2 = 1 \quad (13)$$

در این رابطه λ_i مقادیر ویژه ماتریس غیر ایزوتروپی می‌باشند. اگر مقدار λ_1 بزرگ بوده، در حالی که مقادیر $\lambda_2 = \lambda_3$ کوچک باشند، تانسور المان بیضی کشیده شده و در شرایطی که λ_1 کوچک بوده اما $\lambda_2 = \lambda_3$ بزرگ باشند، تانسور تنش به شکل بیضی پخ شده خواهد بود. برای بررسی این موضوع نقاط مختلفی در اطراف آبشکن تیغه‌ای انتخاب شده (شکل 13- الف) و نتایج شکل تانسور المان در شکل 13- ب ارائه شده است. با توجه به شرایط کلی یکسان در مورد ساختار آشفته‌گی در اطراف هر دو آبشکن، بررسی‌ها تنها در مورد آبشکن تیغه‌ای انجام می‌شود.

نقاط در نظر گرفته شده در بالادست آبشکن (1) در نزدیک



شکل 13 نقاط در نظر گرفته شده در تحلیل المان تانسور تنش و شکل تانسورهای تنش در این نقاط

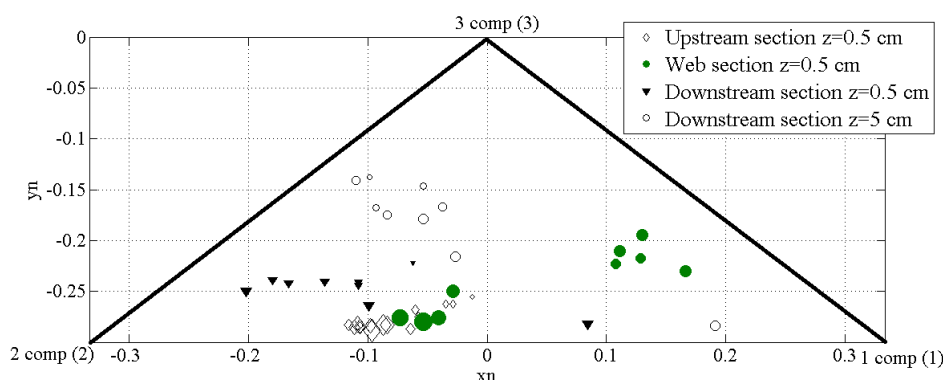
4-3- نقشه‌های BM، AIM و طیف انرژی جنبشی

آشفتگی

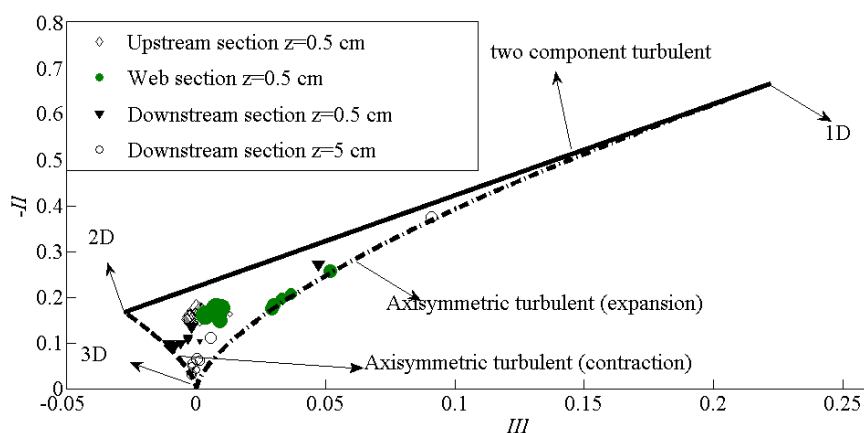
شکل‌های 14 و 15 نشان دهنده نقشه (BM) و نقشه غیر ایزوتروپی (AIM) برای نقاط مختلف در اطراف آبشکن تیغه‌ای می‌باشد. برای ایجاد تمایز بین نقاط قرار گرفته در فواصل مختلف تا دیواره خارجی کانال، در هر گروه، با افزایش فاصله نقطه مورد بررسی از ساحل خارجی ابعاد نشانگرها بزرگتر شده است. نقشه BM نشان می‌دهد که در مقطع بالادست آبشکن تمام نقاط مورد بررسی به شرایط آشفتگی دو مؤلفه‌ای نزدیک بوده و روند کلی نشان دهنده این است که با افزایش فاصله از دیواره خارجی شرایط به شرایط دو مؤلفه‌ای شدن نزدیکتر می‌شود. در مقطع قرارگیری جان آبشکن داده‌ها را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد.

نقطه 3 که در درون گردابه نعل اسبی قرار دارد، همانند نقطه 2 بیشتر به شرایط سه مؤلفه‌ای آشفتگی نزدیک است، با این تفاوت که مقدار پخش شدگی بیضی‌گون نسبت به نقطه 2 کمتر بوده و شرایط آشفتگی در جهات مختلف بیشتر به یکدیگر نزدیک می‌باشد. نقطه 4 در درون لایه برشی شکل گرفته در اطراف آبشکن قرار دارد. کشیدگی زیاد المان تانسور غیر ایزوتروپی نسبت به سایر نقاط در نظر گرفته شده کاملاً مشخص است و نشان دهنده این است که در این ناحیه نقاط به سمت آشفتگی یک مؤلفه‌ای میل خواهند کرد.

نقطه 5 در درون ناحیه جریان برگشتی تشکیل شده در پایین‌دست آبشکن و در تراز میانی جریان در نظر گرفته شد. در این نقطه نیز شکل تانسور به شکل شرایط آشفتگی پخش شده شبیه می‌باشد.



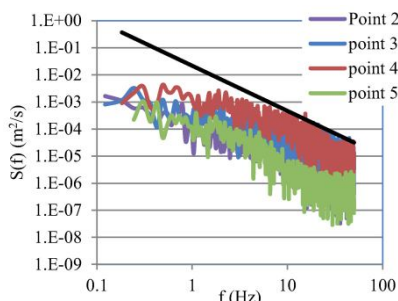
شکل 14 نقشه BM برای نقاط قرار گرفته در اطراف آبشکن تیغه‌ای



شکل 15 نقشه BM برای نقاط قرار گرفته در اطراف آبشکن تیغه‌ای

همخوانی دارد. مقایسه نتایج ارایه شده در این بخش نشان دهنده نزدیک بودن نتایج نقشه BM با نقشه AIM بوده و بنظر می‌رسد با توجه به شکل المان تانسورهای نشان داده شده در شکل 13 نتایج روش BM همخوانی بهتری با این اشکال داشته و نیاز است که برای اثبات این موضوع برای مسایل و شرایط دیگر آزمایش‌هایی انجام شود.

شکل 16 نشان دهنده طیف انرژی آشفتگی برای سرعت‌های در جهات مختلف و بردار سرعت برای نقاط مشخص شده در شکل 13 می‌باشد. روند کلی نشان دهنده کاهش انرژی با افزایش فرکانس می‌باشد. این کاهش انرژی با افزایش فرکانس مربوط به انتقال انرژی از فرکانس‌های کوچک (گردابه‌های بزرگ) به فرکانس‌های بزرگ (گردابه‌های کوچک) می‌باشد. در نقاط 4 و 5 برای فرکانس‌های بزرگتر از 30 Hz استهلاک انرژی از بین رفته و حاکمیت نویزهای موجود در سری زمانی مشهود است. داده‌های اندازه‌گیری شده نشان دهنده این است که در محدوده‌ای از فرکانس‌ها طیف آشفتگی از قانون $(\frac{5}{3})^-$ کموگروف پیروی می‌کند. نقاط مختلف قرار گرفته در اطراف آبشکن مقادیر طیف‌های مختلف و انرژی‌های مختلفی را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهند، بطوری که از بین داده‌های بررسی شده در این تحقیق بیشترین مقدار طیف انرژی آشفتگی در محل تشکیل گردابه نعل اسبی (نقطه 3) و لایه برشی (نقطه 4) مشاهده شده و مقادیر مشاهده شده در بالادست و ناحیه چرخشی پایین- دست مقدار طیف انرژی آشفتگی کمتر می‌باشد.



شکل 16 طیف انرژی آشفتگی برای نقاط مختلف نشان داده شده در شکل 13

شکل‌های 17- الف و ب نشان دهنده طیف‌های انرژی

بخش اول که نقاط نزدیک به آبشکن بوده و مقادیر مختصات طولی آنها مثبت می‌باشد و به شرایط آشفتگی با تقارن محوری انبساطی نزدیک می‌باشند و بخش دوم مربوط به نقاط قرار گرفته در میانه‌های کانال بوده و این نقاط در نزدیک شرایط آشفتگی دو مؤلفه‌ای و خط 12 می‌باشند.

گروه‌هایی که برای مقطع پایین‌دست در نظر گرفته شده‌اند، مربوط به نقاطی است که در منطقه جریان برگشتی قرار داشته و در این گروه‌ها بیشترین فاصله نقاط در نظر گرفته شده تا ساحل خارجی، مربوط به دو نقطه می‌باشد که در لایه برشی شکل گرفته در اطراف آبشکن قرار دارند. تمام نقاط قرار گرفته در ناحیه جریان برگشتی مختصات طولی منفی داشته که نشان دهنده نزدیک بودن آشفتگی در این نقاط به شرایط آشفتگی انقباضی می‌باشد. در همین مقطع و در ناحیه جریان برگشتی، تمام نقاط قرار گرفته در تراز میانی جریان در نقشه BM بالاتر از نقاط قرار گرفته در تراز نزدیک بستر بوده که نشان دهنده بیشتر بودن شرایط آشفتگی سه مؤلفه‌ای در ترازهای میانی می‌باشد. هر دو نقطه قرار گرفته در لایه برشی که مختصات طولی مثبت داشته و نسبت به سایر نقاط به شرایط آشفتگی یک مؤلفه‌ای و دو مؤلفه‌ای نزدیکتر می‌باشد و از شرایط ایزوتروپیک آشفتگی بشدت فاصله می‌گیرند. نقشه AIM همان روند مشاهده شده در مورد نقاط قرار گرفته در لایه برشی را که در نقشه BM مشاهده شد، نشان می‌دهد. تعدادی از نقاط قرار گرفته در مقطع قرارگیری آبشکن کاملاً نزدیک به مرز انبساط محوری دو مؤلفه‌ای قرار گرفته‌اند، اما همین نقاط با مقداری فاصله از این مرز در نقشه BM مشاهده می‌شوند. همین روند برای تعدادی از نقاط قرار گرفته در منطقه جریان چرخشی در پایین‌دست آبشکن مشاهده می‌شوند، به این ترتیب که تعدادی از نقاط در این ناحیه در نقشه AIM درست نزدیک به مرز انقباض متقارن محوری قرار دارند. در بالادست آبشکن روند مشاهده شده در نقشه BM در نقشه AIM نیز مشاهده می‌شود و به شرایط دو مؤلفه‌ای نزدیک می‌باشند. روند مشاهده شده در مورد نزدیک بودن نقاط موجود در پایین‌دست آبشکن و در ترازهای میانی به شرایط ایزوتروپیک با روند مشاهده شده در نقشه BM

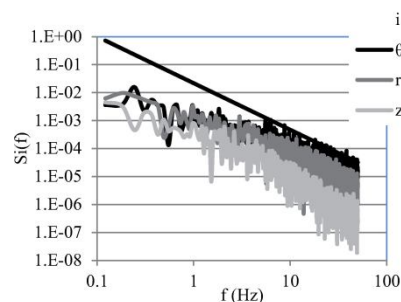
گردابه نعل اسبی نسبت به لایه برشی می‌باشد. در لایه برشی، وجود محدوده وسیعتری از فرکانس‌ها که شیب طیف آنها کمتر از قانون $(-\frac{5}{3})$ کلموگروف می‌باشد نشان از وجود محدوده وسیعتر تولید انرژی جنبشی آشفتگی در این ناحیه دارد، در حالی که مقدار انرژی جنبشی آشفتگی در محدوده تولید آن برای گردابه نعل اسبی در مقایسه با لایه برشی بیشتر است.

4- نتیجه‌گیری

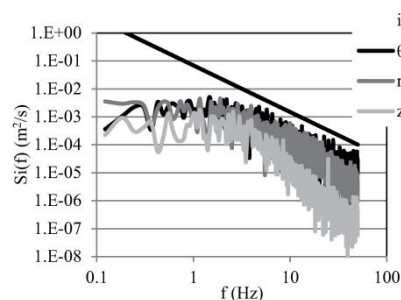
در این تحقیق با توجه به روش‌های کمی‌سازی و طبیعت سنجی، میزان غیر ایزوتروپ بودن جریان در نقاط مختلف و طبیعت آن در نقاط مختلف جریان اطراف آبشکن تیغه‌ای و T شکل بررسی شد. روندهای مشابهی در مورد میزان غیر ایزوتروپ بودن جریان در اطراف هر دو آبشکن مشاهده شد. شرایط دو مؤلفه‌ای آشفتگی جریان در ترازهای نزدیک بستر و نزدیک شدن به شرایط دیسکی (کلوچه‌ای شکل) با توجه به اثر استهلاك آشفتگی در راستای قائم مشاهده شد. در حالی که در ترازهای میانی میزان آشفتگی در جهت قائم نیز افزایش یافته و در نتیجه شرایط به شرایط ایزوتروپیک آشفتگی (طبیعت کروی المان سیال) نزدیکتر می‌باشد. در محل قرارگیری جان آبشکن تمام روش‌ها نشان دهنده آشفتگی تقریباً سه مؤلفه‌ای در نزدیک نوک آبشکن و افزایش این روند در محل ایجاد گردابه نعل اسبی مشهود می‌باشد. در محل تشکیل گردابه ثانویه دوم در میانه عمق جریان در نزدیک ساحل خارجی قوس نیز نزدیکی به شرایط سه مؤلفه‌ای آشفتگی وجود دارد. در محل تشکیل لایه برشی اطراف آبشکن شرایط آشفتگی از شرایط ایزوتروپیک آشفتگی فاصله گرفته و شرایط آشفتگی جریان به سمت شرایط آشفتگی تک مؤلفه‌ای میل می‌کند و این مسأله می‌تواند یکی از دلایل ایجاد خطا در مدل‌سازی عددی (مدل‌های آشفتگی بر مبنای شرایط ایزوتروپیک جریان) در این ناحیه باشد. در نقاط قرار گرفته در اطراف این لایه برشی آشفتگی به اندازه ناحیه لایه برشی غیر ایزوتروپ نمی‌باشد. در نقشه‌های BM و AIM نزدیکی نقاط مورد بررسی در نزدیک بستر به خط 12 نشان دهنده نزدیک

آشفتگی برای مؤلفه‌های مختلف سرعت در دو نقطه قرار گرفته در گردابه نعل اسبی (نقطه 3) و درون لایه برشی (نقطه 4) می‌باشد. همپوشانی بیشتر طیف‌ها در فرکانس‌های مختلف نشان دهنده این است که گردابه‌های با شرایط ایزوتروپی بیشتر از این نقاط عبور کرده، در حالی که فاصله بیشتر طیف‌ها نیز دلیل بر غیر ایزوتروپ بودن بیشتر آشفتگی در آن نقطه می‌باشد.

البته با توجه به محدوده عدد رینولدز جریان در این تحقیق نمی‌توان انتظار داشت که همپوشانی کامل بین طیف‌های انرژی ایجاد شود، اما نزدیک بودن این طیف‌ها در محدوده وسیعتری از فرکانس نشان دهنده شرایط ایزوتروپی بیشتر جریان در آن نقطه می‌باشد.



الف- نقطه 3



ب- نقطه 4

شکل 17 طیف مؤلفه‌های مختلف سرعت در نقاط 3 و 4

در گردابه نعل اسبی نسبت به لایه برشی در محدوده وسیعتری از فرکانس‌ها، طیف‌های انرژی آشفتگی مؤلفه‌های مختلف سرعت به یکدیگر نزدیک شده که نشان دهنده شرایط بهتر ایزوتروپی جریان در این ناحیه نسبت به لایه برشی می‌باشد. در محدوده همپوشانی طیف‌های مختلف سرعت، پیروی از قانون $-\frac{5}{3}$ کلموگروف نشان دهنده وجود محدوده وسیعتری از زیر دامنه ماند در

u_z	مولفه سرعت در جهت عمودی
Y	عمق جریان
II	ثابت دوم غیر ایزوتروپی
III	ثابت سوم غیر ایزوتروپی
λ_i	مقادیر ویژه ماتریس غیر ایزوتروپی

6- مراجع

خسروی مشیزی، م. (1390). "بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل مستغرق در قوس 90 درجه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

شریعت زاده، ی. (1390). "بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل جاذب و دافع، مستقر در قوس 90 درجه در حالت استغراق"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

فضلی، م. (1387). "مطالعه آزمایشگاهی الگوی آبشستگی پیرامون آبشکن مستقر در قوس 90 درجه"، رساله دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

مهرآیین، م.، نوریخس، س.، م. و قدسیان، م. (1394). "بررسی میدان جریان اطراف آبشکن T شکل مستغرق"، مجله عمران مدرس، 15(3)، ص.ص. 185-194.

واقفی، م. (1388). "مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن های T شکل مستقر در قوس 90 درجه"، رساله دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

Banerjee, S., Krahl, A. R., Durst, B, F. and Zenger, A (2007). "Presentation of anisotropy properties of turbulence, invariants versus eigenvalue approaches", J. Turbul, 8(32), pp. 1-27.

Dey, S. and Barbhuiya, A. K. (2006). "3D flow field in a scour hole at a wing-wall abutment", J. Hydraul. Res, 44(1), pp. 33-50.

Darko R. Radenković ., Jela M. Burazer and Đorđe M. Novković (2014). "Anisotropy analysis of turbulent swirl flow", FME Transactions, 42, pp. 19-25.

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.

Duan, J.G., He, L., Wang, G.Q. and Fu, X.D.

شدن آشفتگی در این مناطق به شرایط آشفتگی دو مؤلفه ای می باشد. در مقطع پایین دست نیز داده های موجود در نقشه BM و AIM به دو دسته تقسیم می شوند که داده های مربوط به گردابه چرخشی به نقطه 3 نزدیکتر شده، در حالی که در خارج از منطقه جریان برگشتی نقاط به خط 12 و شرایط دو مؤلفه ای نزدیکتر می شوند. کمترین فاصله از نقطه 1 و نزدیک شدن به شرایط آشفتگی تک مؤلفه ای مربوط به نقطه قرار گرفته در داخل لایه برشی می باشد. نتایج مربوط به طیف انرژی جنبشی آشفتگی برای بردار سرعت و مؤلفه های مختلف سرعت نشان دهنده این است که طیف انرژی جنبشی آشفتگی در گردابه نعل اسبی بیشترین مقدار را نسبت به سایر نقاط داشته، اما محدوده فرکانسی تولید انرژی جنبشی آشفتگی در لایه برشی نسبت به گردابه نعل اسبی وسیعتر می باشد. در گردابه نعل اسبی زیر دامنه ماند در محدوده وسیعتری از فرکانس ها نسبت به لایه برشی پایین دست آبشکن مشاهده می شود.

5- فهرست علائم

α	محل قرارگیری آبشکن نسبت به ابتدای قوس
C_1	ضریب تناسب آشفتگی یک مؤلفه ای
C_2	ضریب تناسب آشفتگی دو مؤلفه ای
C_3	ضریب تناسب آشفتگی سه مؤلفه ای
C_{ani}	پارامتر نشان دهنده میزان غیر ایزوتروپ بودن
d_{50}	قطر متوسط مصالح بستر
f	فرکانس
J	تابع نشان دهنده فاصله از مرز شرایط دو مؤلفه ای آشفتگی و نزدیکی به شرایط سه مؤلفه ای آشفتگی
L	طول جان آبشکن
l	طول بال آبشکن
$S(f)$	طیف انرژی آشفتگی
$Si(f)$	طیف انرژی آشفتگی در جهت i
TKE	انرژی جنبشی آشفتگی
u_c	سرعت بحرانی جریان برای حرکت رسوبات
u	سرعت متوسط جریان ورودی
u_θ	مولفه سرعت در جهت مماسی
u_r	مولفه سرعت در جهت شعاعی

dimensional features of the turbulent flow around series of groynes with different shapes of head", J. of JSCE, Ser.B1 (Hydraulic Engineering), 68(4), pp. 61-66.

Niell, C. R. (1973). *Guide to Bridge Hydraulics*, University of Toronto Press, Toronto, Canada.

Pagliara, S, Hassanabadi, L. and Mahmoudi Kurdistani, S. (2015). "Clear water scour downstream of log deflectors in horizontal channels", J. Irrig. Drain. Eng. 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000869.

Safarzadeh, A., Salehi Neyshabouri, S., and Zarrati, A. (2016). "Experimental investigation on 3D turbulent flow around straight and T-shaped groynes in a flat bed channel", J. Hydraul. Eng., [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001144](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001144), 04016021.

Safarzadeh, A. Salehi, S.A.A. Ghodsian, M., and Zarrati, A.R. (2010). "Experimental study of head shape effects on shear stress distribution around a single groyne", The Proceeding of River Flow, 1, pp. 651-658.

Yaeger, M. A. (2009). "Mean flow and turbulence around two series of experimental dikes", MSc Thesis, University of Arizona.

(2011). "Turbulent burst around experimental spur dike", Int. J. Sediment. Res. 26(4), pp. 471-486.

Dey S. and Barbhuiya A. K. (2006). "Velocity and turbulence in a scour hole at a vertical-wall abutment", Flow Meass Inst, 17(1), pp. 13-21.

Goring, D. and Nikora, V. (2002). "Despiking acoustic doppler velocimeter data", J. Hydraul. Eng, 128(1), pp. 117-126.

Krogstad, P. and Torbergsen, L. (2000). "Invariant analysis of turbulent pipe flow", Flow. Turbul. Combust., 64, pp. 161-181.

Lumley, J.L. 1978, "Computational modeling of turbulent flows". Adv. Appl. Mech., 18, pp. 123-176.

Lumley, J. L. and Newman, G. (1977). "The return to isotropy of homogeneous turbulence", J. Fluid Mech., 82, pp. 161-178.

Mansoori, A.R. Nakagawa, H., Kawaike, K., Zhang, H., and Safarzadeh, A. (2012 a). "Study of the characteristics of the flow around a sequence of non-typically shaped spur dikes installed in a fluvial channel", Annu. Disas., Prev. Res. Inst. Kyoto. Univ, 55 (B), pp. 453-458

Mansoori, A.R., Nakagawa, H., Kawaike, K., Zhang, H. and Safarzadeh, A. (2012 b). "Three-