

## بررسی پدیده انفجار آشفته‌گی اطراف آبشکن مستغرق در خم کانال

مجتبی مهرآیین<sup>1\*</sup>، مسعود قدسیان<sup>2</sup>

1- استادیار گروه عمران، دانشگاه خوارزمی، تهران

2- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* mehraein@khu.ac.ir

**چکیده** - در تحقیق حاضر بررسی میدان جریان در نزدیک بستر اطراف آبشکن مستغرق قرار گرفته در قوس انجام شد. برای این منظور میدان جریان اطراف آبشکن‌های مستغرق با استفاده از دستگاه ADV اندازه‌گیری و بحث و بررسی در مورد پدیده انفجار آشفته‌گی در نزدیک بستر انجام شد. برای تحلیل دقیق میدان جریان نزدیک بستر از پارامترهای مختلف آماری و آشفته‌گی از جمله سرعت میانگین جریان، احتمال ایجاد پدیده‌های چهارگانه، زاویه اعمال پدیده‌های چهارگانه، میزان پایداری و تبدیل پدیده‌ها به یکدیگر، تنش‌های رینولدز و شار انرژی آشفته‌گی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که ارتباطی بین میدان جریان و فرایند آبشستگی که توسط تحقیقات پیشین ارائه شده است، وجود دارد. شار انرژی آشفته‌گی، تخمین تنش‌های برشی وارد بر بستر، احتمال ایجاد پدیده‌ها و زوایای اعمال پدیده‌ها می‌توانند برای شناسایی نقاط مستعد آبشستگی استفاده شوند. تشکیل جریان‌های برگشتی در بالادست و پایین‌دست آبشکن موجب تقویت پدیده‌های اندرکنشی در این نواحی شده، در حالی که پدیده‌های بیرون رانی و جاروبی در ناحیه خارج از جریان‌های برگشتی سهم بیشتری داشته و در محدوده لایه برشی تشکیل شده در اطراف آبشکن قدرت بیشتری دارند. مقایسه بین فرایند انتقال رسوبات در اطراف آبشکن مستغرق با درصد استغراق کم و زیاد نشان داد که قدرت بیشتر تنش‌های برشی وارد بر بستر یکی از عوامل انتقال رسوبات از ناحیه نوک بالادست آبشکن با درصد استغراق کم می‌باشد، در حالی که در آبشکن با درصد استغراق زیاد افزایش تنش برشی وارد بر بستر در پایین‌دست آبشکن و در ناحیه برگشتی جریان، به دلیل ریزش جریان از تاج آبشکن موجب آبشستگی و حمل رسوبات توسط جریان برگشتی در این منطقه به سمت جان آبشکن و ته نشینی می‌شود. تفاوت موجود بین حداکثر مقادیر تنش‌های برشی وارد بر بستر بین آبشکن با درصد استغراق زیاد و کم و نیز بیشتر بودن شار انرژی آشفته‌گی در آبشکن با درصد استغراق کم در این نواحی می‌تواند قدرت بیشتر جریان برای آبشستگی در اطراف آبشکن با درصد استغراق کم و بزرگتر بودن حفره آبشستگی در اطراف این نوع آبشکن را توجیه کند.

**کلیدواژه‌گان:** انفجار آشفته‌گی، آبشکن مستغرق، میدان جریان نزدیک بستر، پدیده‌های چهارگانه آشفته‌گی.

### 1- مقدمه

فضلی و همکاران (2008) اشاره کرد. از آنجا که آبشکن‌ها موجب انحراف خطوط جریان از دیواره نزدیک به سمت دیواره دور می‌شوند و این انحراف خطوط جریان همراه با ایجاد آشفته‌گی در محل نصب آبشکن‌ها می‌باشد، حفره آبشستگی تشکیل شده در اطراف این نوع سازه‌ها مورد توجه خاص بوده و تحقیقات بسیاری در مورد نحوه تأثیرگذاری پارامترهای مختلف بر ابعاد حفره آبشستگی

از دیرباز استفاده از سازه‌های مخصوص ساماندهی رودخانه یکی از روش‌های کنترل آبشستگی دیواره‌های رودخانه‌ها بوده و حفره‌های تشکیل شده در اطراف این سازه‌ها که یکی از انواع آنها آبشکن می‌باشد، مورد توجه بسیاری از محققان بوده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط پاگلیارا و همکاران (2015) و

پرداخته می‌شود و آنگاه با توجه به ابعاد حفره آبشستگی و روند گزارش شده از توسعه حفره آبشستگی که توسط محققان قبلی ارایه شده است، به بررسی میدان جریان نزدیک بستر و مقایسه آن با روند آبشستگی گزارش شده پرداخته می‌شود.

## 2- وسایل و روش انجام آزمایش

آزمایش‌های این تحقیق با استفاده از کانال آزمایشگاهی موجود در دانشگاه تربیت مدرس که دارای قوس 90 درجه بود، انجام شد. این کانال از سه بخش کانال مستقیم بالادست، قوس و کانال مستقیم پایین دست تشکیل شده است. عرض و ارتفاع این کانال در تمام مقاطع به ترتیب 60 و 70 سانتی‌متر بود. طول کانال مستقیم بالادست و پایین دست 6 متر بود که توسط یک قوس به شعاع داخلی 2/4 متر به یکدیگر متصل شده بودند. با توجه به نسبت شعاع قوس کانال به عرض کانال و با توجه به تحقیقات انجام شده توسط لسچنر و رودی (1979) می‌توان این قوس را جزو قوس‌های ملایم دسته‌بندی کرد. در انتهای کانال دریچه‌ای برای تنظیم عمق جریان کانال مورد استفاده قرار گرفت و برای اندازه‌گیری عمق جریان از عمق‌سنجی با دقت 0/1 میلی‌متر استفاده شد. عمق کانال تا ارتفاع 30 سانتی‌متری از بستر از رسوباتی با دانه‌بندی تقریباً یکنواخت که قطر میانگین آنها 1/28 میلی‌متر بود، پوشیده شد. از آنجا که بررسی میدان جریان نزدیک بستر در شرایط بستر ثابت انجام شد، کف بستر با استفاده از دوغاب ماسه سیمان و توسط کمپرسور هوا تثبیت گردید تا در طول مدت زمان انجام آزمایش‌ها از جابجایی رسوبات جلوگیری شود. آبشکن‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع T شکل و با اندازه طول جان و بال 10 سانتی‌متر بودند که در زاویه 45 درجه نسبت به ابتدای قوس قرار گرفتند. در تحقیق حاضر میزان استغراق آبشکن برابر است با نسبت عمق آبی که بر روی آبشکن قرار دارد، به فاصله قرارگیری تاج آبشکن تا بستر رسوبات (s). این آزمایش‌ها در دو درصد استغراق 5% و 50% انجام شد. در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق برای تنظیم استغراق آبشکن عمق جریان ثابت در نظر گرفته شد، در

انجام شده است که از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات اخیر انجام شده توسط الاوادی و مانسانوری (2000)، کلمن و همکاران (2003)، واقفی و همکاران (2009 و 2012) و پاگلیارا و همکاران (2015) اشاره کرد. مطالعات انجام شده توسط محققان در مورد میدان جریان اطراف آبشکن‌ها عمدتاً در مورد میدان جریان میانگین بوده است و بحث و بررسی در این مورد به سرعت‌های میانگین، خطوط جریان و ابعاد و اندازه‌های گردابه‌های شکل گرفته محدود می‌شود. از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط فضلی و همکاران (2008) و واقفی و همکاران (2009 و 2012) اشاره کرد. بر طبق این تحقیقات جریان‌های بازگشتی (گردابه‌های نعل اسبی و جریان پایین رونده) سهم مهمی در انتقال رسوبات دارند. تحقیقات انجام شده در مورد میدان جریان آشفته شکل گرفته در اطراف آبشکن‌ها محدود بوده و صفرزاده (1388) در این مورد بررسی‌هایی انجام داده است. مطابق این تحقیق شکل‌های مختلف آبشکن‌ها مورد بررسی قرار گرفته و آبشکن T شکل کمترین تنش برشی را در اطراف خود دارد. تحقیقاتی نیز توسط کوهنل و همکاران (2008 و 2013) در مورد تأثیر استغراق بر میدان جریان شکل گرفته در اطراف آبشکن‌ها انجام شده است و در این تحقیقات میدان جریان اطراف این نوع آبشکن‌ها مدل‌سازی عددی شده که تشابه خوبی بین مدل عددی و آزمایشگاهی برقرار می‌باشد.

تحقیقات توسط دوان و همکاران (2009 و 2011) از معدود تحقیقاتی است که در مورد پدیده‌های چهارگانه اطراف آبشکن‌ها انجام شده است. نتایج این تحقیقات نشان داده است که پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی سهم بزرگی در انتقال رسوبات از اطراف آبشکن‌ها دارند.

باوجود تحقیقات بسیاری که در مورد میدان جریان و آبشستگی اطراف آبشکن‌ها انجام شده است، اما بررسی تأثیر میزان استغراق بر پارامترهای آشفستگی نزدیک بستر و ارتباط آن با میزان آبشستگی شکل گرفته در اطراف آبشکن‌های مستغرق انجام نشده است؛ از این رو در این تحقیق ابتدا به بررسی میدان جریان اطراف این آبشکن‌ها با تأکید بر میدان جریان برداشت شده در نزدیک بستر

هینز (1975) استفاده شد؛ به این ترتیب که برداشت داده‌ها تا 20 دقیقه برای یک نقطه کاندید در بالادست و در اطراف آبشکن انجام شد، اما بررسی‌ها نشان داد که تغییرات پارامترهای آشفتگی در نقطه بالادست آبشکن بین 1 دقیقه و 20 دقیقه حدود 5% بوده، در حالی که این زمان برای نقاط نزدیک آبشکن 5 دقیقه بود؛ از این رو این زمان‌ها برای برداشت میدان جریان در هر نقطه استفاده شد (کامینو و همکاران 2012). البته بعد از فیلتراسیون داده‌ها برای تمام نقاط که با استفاده از روش ارایه شده توسط گورینگ و نیکورا (2003) انجام شد، داده‌های باقی‌مانده بیشتر از 1000 عدد بود که مطابق تحقیقان یاگر (2009) این تعداد داده برای بررسی آشفتگی جریان کفایت می‌کند.

### 3- نتایج بدست آمده از برداشت میدان جریان

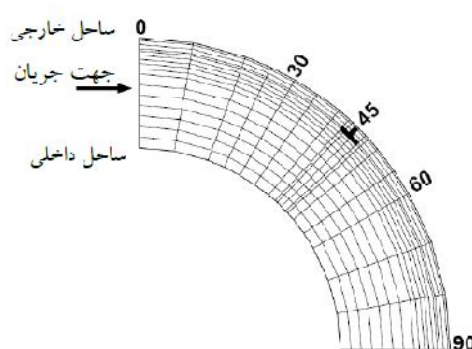
در این بخش با توجه به میدان جریان برداشت شده در لایه نزدیک بستر اطراف آبشکن‌ها پارامترهای مهمی از جمله سرعت میانگین جریان، احتمال ایجاد پدیده‌های چهارگانه آشفتگی، زوایای اعمال پدیده‌های چهارگانه آشفتگی، میزان پایداری و تبدیل این پدیده‌ها به یکدیگر و میزان شار انرژی آشفتگی پرداخته می‌شود.

#### 3-1- سرعت‌های میانگین

شکل‌های 2 نشان دهنده منحنی‌های هم‌تراز سرعت‌ها در راستاهای مختلف در لایه نزدیک بستر رسوبات می‌باشد. با توجه به شکل‌های 2- الف و ب، در محل قرارگیری آبشکن‌ها، به دلیل انقباض مقطع عبور جریان، مؤلفه سرعت‌های مماسی ( $u_{\theta}$ ) ناحیه‌ای پر سرعت در مقطع قرارگیری آبشکن ایجاد می‌کند که سرعت جریان را تا  $40 \text{ cm/s}$  در محل قرارگیری آبشکن با درصد استغراق کم ( $s=5\%$ ) و  $35 \text{ cm/s}$  در محل قرارگیری آبشکن با درصد استغراق زیاد ( $s=50\%$ ) افزایش می‌دهد. در منطقه بالادست آبشکن با درصد استغراق کم و بین ساحل خارجی و بال آبشکن ناحیه‌ای با مؤلفه مماسی منفی سرعت مشاهده می‌شود که نشان دهنده وجود جریان برگشتی در این ناحیه می‌باشد. این ناحیه در مؤلفه‌های

حالی که با قرار دادن عمق بیشتری از آبشکن در درون ذرات رسوب استغراق آبشکن بیشتر شد. عمق آب در کانال  $11/8$  سانتی‌متر بود که با توجه به سرعت  $0/35$  متر بر ثانیه‌ای جریان درون کانال، دبی جریان  $24/7$  لیتر در ثانیه بود. قبل از تثبیت بستر، آزمایش‌هایی برای تعیین شرایط آستانه حرکت انجام شد. مشاهدات انجام شده نشان داد که تطابق خوبی بین شرایط آستانه حرکت و سرعت آستانه حرکت ارایه شده توسط نیل (1973) وجود دارد. مطابق رابطه ارایه شده توسط نیل (1973) و با توجه به سرعت و عمق جریان در نظر گرفته شده در این تحقیق نسبت سرعت جریان ( $u$ ) به سرعت آستانه حرکت رسوبات بستر ( $u_c$ )،  $0/98$  بود. سرعت‌های نقاط مختلف در درون جریان در نزدیک بستر با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج نقطه‌ای با نام تجاری Vectrino برداشت شد. برای تعیین میزان حداقل فرکانس مورد نیاز برای برداشت داده‌ها از رابطه ارایه شده توسط کارلوس و همکاران (2005) استفاده شد.

با توجه به اهمیت بیشتر میدان جریان در اطراف آبشکن و نیز ساختار جریان پیچیده در این ناحیه، شبکه‌بندی میدان جریان در این ناحیه ریزتر شد. برداشت‌های سرعت‌ها در عمق کانال تنها در فاصله  $0/5$  سانتی‌متری از بستر انجام شد. شکل 1 نشان دهنده نقاط برداشت سرعت در میدان جریان می‌باشد.

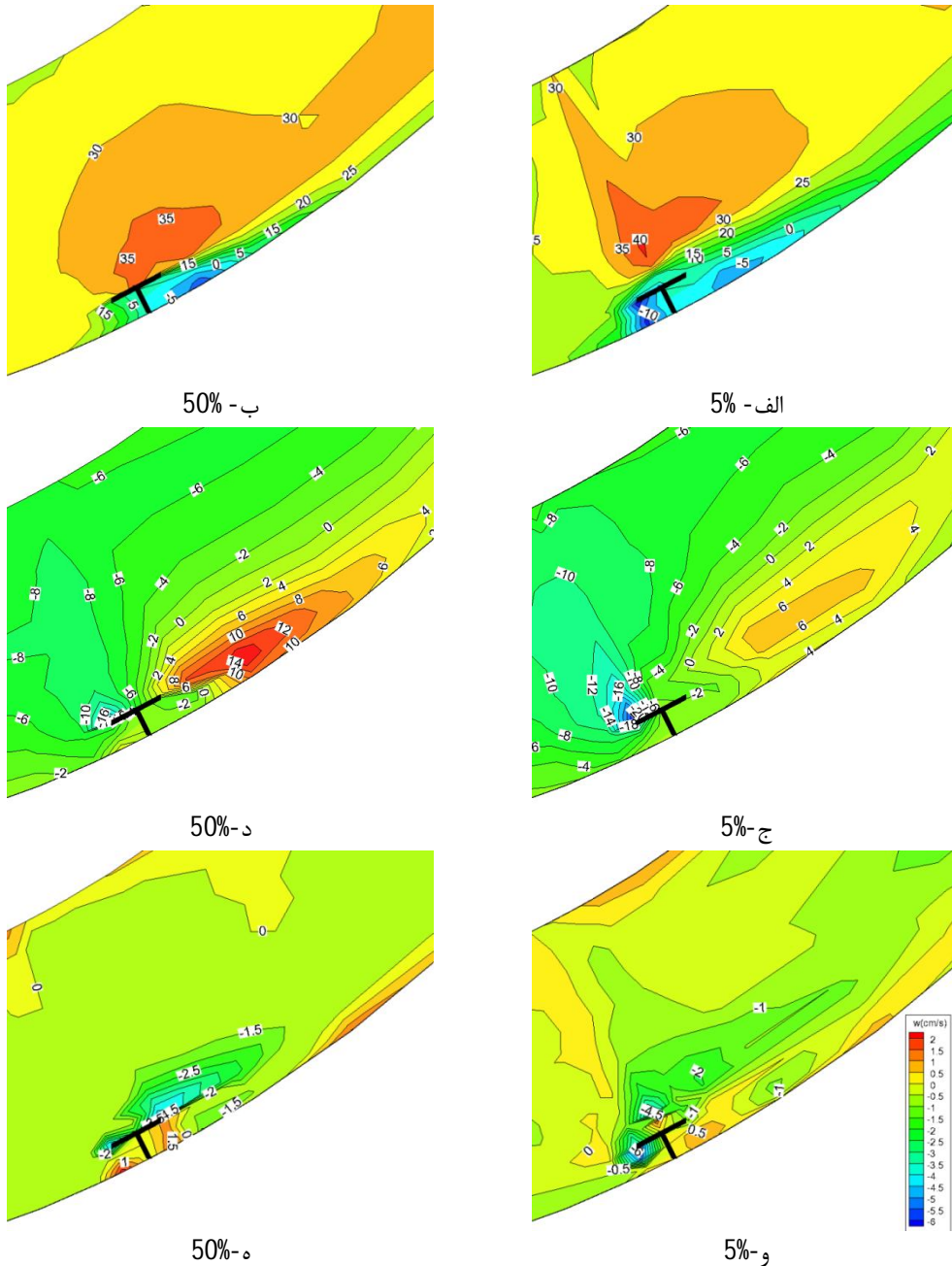


شکل 1 شبکه‌بندی میدان جریان برای برداشت سرعت‌ها

برداشت سرعت‌ها از یک دقیقه در فواصل دور از آبشکن تا 5 دقیقه در نزدیک آبشکن انجام شد. برای تعیین مدت زمان لازم برای برداشت داده‌ها از معیار ارایه شده توسط

امکان نزدیک شدن بیشتر به آبشکن و تأیید وجود این ناحیه توسط منفی بودن مؤلفه مماسی سرعت وجود نداشت. شکل‌های 2-ج و د نشان دهنده منحنی‌های هم‌تراز سرعت‌های شعاعی ( $u_r$ ) برای دو آبشکن مورد بررسی می‌باشند.

مماسی سرعت جریان در آبشکن با درصد استغراق بیشتر مشاهده نشد، اما می‌توان با توجه به شرایط جریان، وجود این جریان را در ناحیه بالادست آبشکن با درصد استغراق زیاد نیز در نظر گرفت که البته نسبت به آبشکن با درصد استغراق کم بسیار کوچکتر می‌باشد. ذکر این نکته لازم است که به دلیل وجود شاخک‌های دستگاه سرعت‌سنج



شکل 2 منحنی‌های هم‌تراز مؤلفه‌های مختلف سرعت برای دو آبشکن با درصد استغراق کم و زیاد الف و ب- مؤلفه مماسی سرعت، ج و د- مؤلفه شعاعی سرعت و و ه- مؤلفه عمقی سرعت

می‌باشد و جریانی که با برخورد به بستر به سمت بالادست حرکت کرده و مؤلفه عمقی سرعت آن مثبت می‌باشد. در شرایطی که استغراق آبشکن کم می‌باشد، جریان رو گذری از روی تاج آبشکن قدرت کمتری دارد.

### 3-2- پدیده انفجار آشفستگی

پدیده انفجار آشفستگی شامل فرایندی است که در آن بسته‌های سیال نزدیک بستر در نتیجه موج شدن سطوح جریان نزدیک بستر که می‌تواند در نتیجه وجود ناهمواری‌های نزدیک بستر باشد، از ترازهای نزدیک بستر جدا شده و به ترازهای بالایی انتقال می‌یابد. در نتیجه این انتقال بسته‌های سیال به ترازهای بالایی و برای برقراری رابطه پیوستگی، بسته‌های پرسرعت سیال از ترازهای بالایی به بستر حمله می‌کنند. انتقال بسته‌های کم سرعت نزدیک بستر به ترازهای بالایی را با عنوان پدیده بیرون‌رانی و انتقال بسته‌های سیال با سرعت زیاد از ترازهایی بالایی به سمت بستر را پدیده جاروبی می‌گویند. با توجه به اینکه بسته‌های کم سرعت سیال در پدیده بیرون‌رانی به سمت ترازهای بالایی حرکت می‌کنند، نوسانات سرعت در راستای طولی و عمقی جریان در این پدیده، به ترتیب منفی و مثبت می‌باشند، اما در پدیده جاروبی با توجه به انتقال بسته‌های سیال پر سرعت به سمت بستر، نوسانات مؤلفه‌های سرعت در راستای طولی و عمقی جریان به ترتیب مثبت و منفی می‌باشند. با توجه به اینکه امکان این که نوسانات سرعت‌های سطحی و عمقی هم علامت نیز باشند، وجود دارد، در شرایطی که نوسان مؤلفه سطحی و عمقی سرعت هر دو مثبت باشند، پدیده اندرکنش رو به بیرون و در شرایطی که هر دو منفی باشند، پدیده اندرکنش رو به داخل اتفاق می‌افتد. مجموع 4 پدیده فوق فرایند انفجار آشفستگی را تشکیل می‌دهند و برای بررسی پدیده‌های چهارگانه ذکر شده در هر نقطه، از علامت نوسانات سرعت‌های سطحی و مؤلفه عمقی سرعت استفاده می‌شود. به این منظور از تقسیم نواحی به 5 بخش که در شکل 3 ارائه شده است، استفاده می‌شود. در این شکل اگر نقطه‌ای از سرعت‌های لحظه‌ای در ناحیه I قرارگیرد، پدیده اندرکنش رو به بیرون، در ناحیه II پدیده

در بالادست آبشکن جریان نزدیک بستر رو به ساحل داخلی می‌باشد که دلیل آن را می‌توان وجود جریان ثانویه شکل گرفته ناشی از ورود جریان به درون قوس دانست. در مقطع قرارگیری آبشکن شدت جریان رو به ساحل داخلی به شدت افزایش می‌یابد، که دلیل آن را باید انحراف بیشتر جریان توسط آبشکن به سمت ساحل داخلی و افزایش قدرت جریان ثانویه که در نزدیکی بستر به سمت ساحل خارجی می‌باشد، دانست. در نوک بالادست آبشکن جریان رو به ساحل داخلی شدت بسیار زیادی داشته و مؤلفه عرضی جریان در این مقطع به شدت افزایش یافته است که دلیل آن را می‌توان شکل‌گیری جریان‌های نعل اسبی در این ناحیه، در نتیجه اندرکنش جریان اصلی و جریان برگشتی در بالادست آبشکن دانست. در ناحیه جریان برگشتی شکل گرفته در پایین دست آبشکن ناحیه‌ای مشاهده می‌شود که جریان نزدیک بستر به سمت ساحل خارجی می‌باشد و شدت جریان رو به ساحل خارجی در آبشکن با 50% استغراق، بیشتر می‌باشد. دلیل این مسأله را می‌توان جریان قوی رو گذری عبوری از روی تاج آبشکن دانست که موجب افزایش قدرت مکش جریان برگشتی در پایین دست آبشکن می‌شود. شکل‌های 2- و 2- ه نشان دهنده منحنی‌های هم‌تراز سرعت در راستای عمق کانال (w) می‌باشند. در نقاطی که فاصله زیادی با محل قرارگیری آبشکن دارند مقادیر سرعت در راستای عمق جریان بسیار کم می‌باشد. در نزدیک آبشکن با درصد استغراق زیاد و بین بال آبشکن و ساحل خارجی، به دلیل وجود جریان پایین‌رونده و رو به بالادست، سرعت جریان در جهت عمقی افزایش شدید می‌یابد. در ناحیه نزدیک به نوک بال بالادست آبشکن نیز مؤلفه عمقی سرعت جریان در محل تشکیل گردابه نعل اسبی قابل ملاحظه می‌باشد. در پایین دست آبشکن با درصد استغراق زیاد و بین ساحل خارجی و بال آبشکن ناحیه‌ای مشاهده می‌شود که مؤلفه عمقی سرعت جریان در پایین دست این ناحیه منفی بوده، اما در بالادست آن مثبت می‌باشد. این ناحیه مربوط به جریان ریزشی از روی تاج آبشکن می‌باشد که با برخورد به بستر به دو جریان تقسیم می‌شود. جریانی که رو به سمت پایین دست

احتمال ایجاد هرکدام از پدیده‌های آشفته‌گی در نزدیک بستر پرداخته می‌شود. احتمال ایجاد هرکدام از پدیده‌های چهارگانه در سری زمانی برداشت شده، با استفاده از رابطه (2) تعیین می‌شود (Mianaeiand and Keshavarzy, 2008).

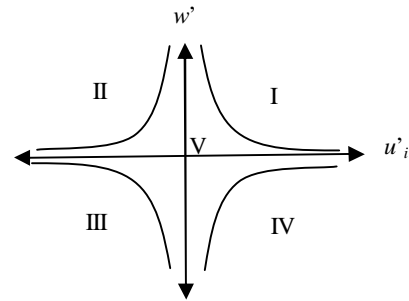
$$p_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^4 n_i} \quad (2)$$

در این رابطه  $n_i$  تعداد پدیده‌های  $i$  است که در طول مدت زمان برداشت داده‌ها اتفاق افتاده است. با توجه به تحقیقات پیشین از جمله بی و همکاران (2004) برای در نظر گرفتن پدیده‌های مهم و تأثیرگذار مقدار  $H$  در رابطه (2)، 2 در نظر گرفته می‌شود. اگر چه که مقادیر مختلفی برای  $H$  در تحقیق حاضر انتخاب شد، اما بصورت مقایسه‌ای تغییری در نتایج ایجاد نشد و برای خلاصه‌نویسی از حساسیت سنجی تحلیل‌ها نسبت به این پارامتر خودداری می‌شود.

شکل‌های 4 نشان دهنده تغییرات احتمال ایجاد پدیده‌های آشفته‌گی در طول کانال در 4 مقطع در عرض کانال و فواصل مختلف تا ساحل خارجی می‌باشد. در شکل 4،  $r$  نشان دهنده فاصله از ساحل خارجی می‌باشد. در بسیاری از نقاط نزدیک بستر احتمال ایجاد پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی برای مؤلفه سرعت مماسی و عمقی بیشتر از پدیده‌های اندرکنشی می‌باشد. در مقاطع نزدیک آبشکن مقداری از احتمال ایجاد این پدیده‌ها کاهش می‌یابد، اما در نقاط دور از آبشکن احتمال ایجاد این پدیده‌ها در تمام نقاط بیشتر می‌باشد. با نزدیک شدن جریان به بدنه آبشکن آشفته‌گی ایجاد شده در میدان جریان (ناشی از شکل‌گیری جریان‌های پایین رونده در بالادست و حد واصل بین ساحل خارجی و بال آبشکن، گردابه‌های نعل اسبی، گردابه‌های القایی کوچک جدا شده از بال آبشکن و...) موجب می‌شود از احتمال ایجاد این پدیده‌ها کاسته شده و احتمال ایجاد پدیده‌های اندرکنشی نسبت به مقاطع بالادست افزایش یابد، حتی در ناحیه جریان برگشتی تشکیل شده در بالادست و پایین دست آبشکن احتمال ایجاد پدیده‌های اندرکنشی افزایش شدیدی می‌یابد.

شکل 5 نشان دهنده تغییرات احتمال ایجاد پدیده‌های

بیرون‌رانی، در ناحیه III پدیده اندرکنش رو به داخل و در ناحیه IV پدیده جارویی اتفاق افتاده است.



شکل 3 تقسیم‌بندی نواحی برای بررسی پدیده انفجار آشفته‌گی

ناحیه V حفره می‌باشد. ناحیه V مربوط به پدیده‌هایی می‌باشد که قدرت چندانی ندارند و معمولاً مرز آنها با ثابت  $H$  در رابطه (1) تعیین می‌شود. نقاطی که درون حفره قرار می‌گیرند قدرت کمی داشته و معمولاً بر فرایندهایی همچون انتقال رسوب که تحت تأثیر فرایند انفجار آشفته‌گی می‌باشند، تأثیرگذار نمی‌باشند (نزو و ناکاگوا 2003).

$$x_Q = \begin{cases} 1 & \text{if } |u_i w'| \geq H \cdot \sqrt{u_i'^2} \cdot \sqrt{w'^2} \\ 0 & \text{if } |u_i w'| < H \cdot \sqrt{u_i'^2} \cdot \sqrt{w'^2} \end{cases} \quad (1)$$

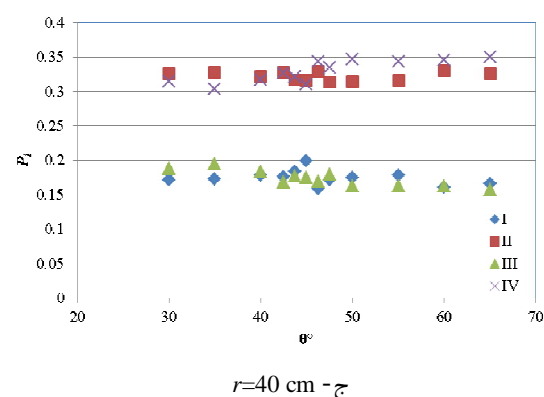
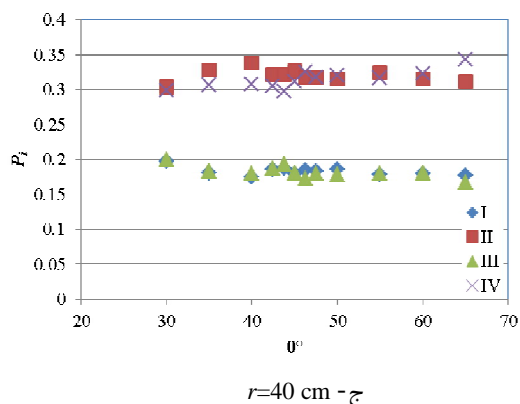
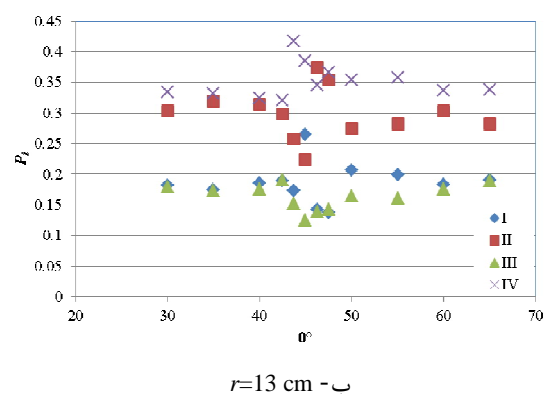
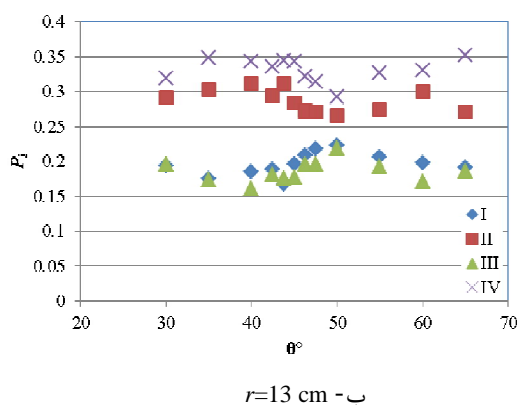
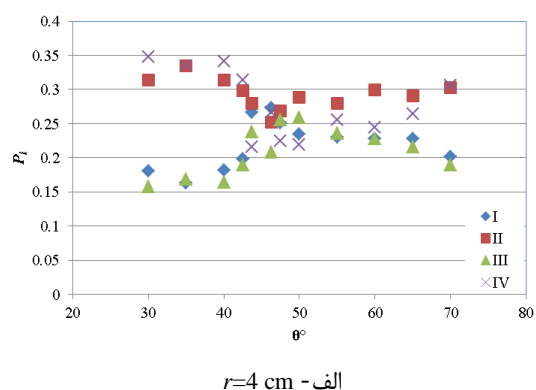
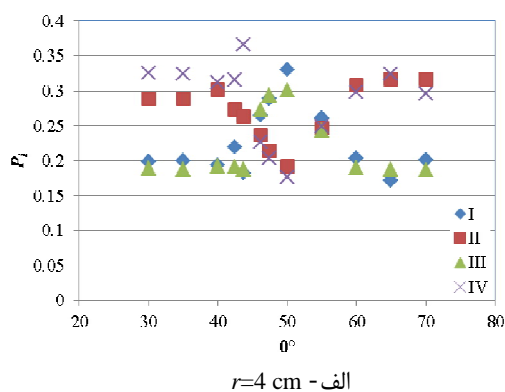
در رابطه بالا  $u_i'$  نوسانات مؤلفه‌های سطحی سرعت و  $w'$  نوسانات مؤلفه عمقی سرعت می‌باشد. در رابطه بالا  $x_Q$  مربوط به پدیده  $Q$  (I, II, III, IV) می‌باشد؛ بطوری که اگر مقدار  $x_Q=1$  شود، پدیده مربوطه در تحلیل‌ها استفاده می‌شود و در صورتی که  $x_Q=0$  شود، نشان دهنده ضعیف بودن پدیده بوده و در تحلیل‌ها استفاده نخواهد شد. هرچقدر مقدار  $H$  بزرگتر انتخاب شود، پدیده‌های قوی‌تر در تحلیل‌ها استفاده خواهند شد.

### 3-2-1- احتمال ایجاد هرکدام از پدیده‌های چهار گانه آشفته‌گی

بررسی احتمال ایجاد پدیده‌های آشفته‌گی که در نزدیک بستر اتفاق می‌افتد، می‌تواند اطلاعات مفیدی از پدیده حاکم در اختیار قرار دهد. در تحقیق حاضر به بررسی

این روند در  $r=13$  cm تعدیل شده، بطوری که در ناحیه نزدیک آبشکن احتمال ایجاد پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی کاهش یافته و این فرایند تا انتهای ناحیه جریان برگشتی شکل گرفته بین دیواره خارجی تا بال آبشکن ادامه می‌یابد، اما همواره در این فاصله از دیواره خارجی احتمال ایجاد پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی از پدیده‌های اندرکنشی بیشتر می‌باشد.

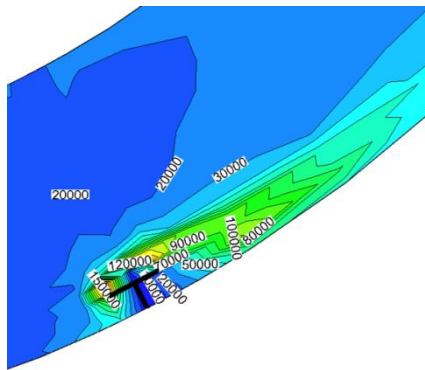
چهارگانه آشفته‌گی در فواصل مختلف تا دیواره خارجی برای شرایط  $s=50\%$  می‌باشد. در این شرایط نیز در اکثر نقاط احتمال ایجاد پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی بیشتر از پدیده‌های اندرکنشی می‌باشد. در  $r=4$  cm تنها در ناحیه جریان برگشتی پایین‌دست است که احتمال ایجاد پدیده‌های اندرکنشی نسبت به پدیده‌های بیرون‌رانی و جارویی بیشتر می‌باشد.



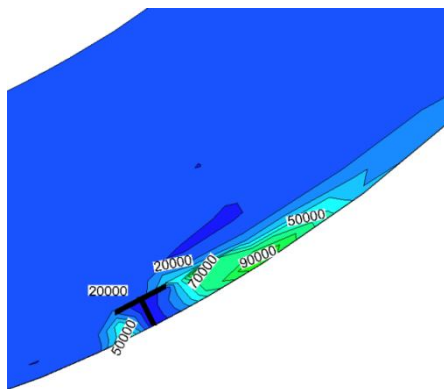
شکل 5 تغییرات احتمال ایجاد پدیده‌های چهارگانه در مقاطع مختلف  $(u'w')$  و  $s=50\%$  (فاصله شعاعی تا ساحل خارجی)

شکل 4 تغییرات احتمال ایجاد پدیده‌های چهارگانه در مقاطع مختلف  $(u'w')$  و  $s=5\%$  (فاصله شعاعی تا ساحل خارجی)

مقدار تنش برشی وارد بر بستر در ناحیه لایه برشی کمتر از نوک بالادست آبشکن می‌باشد.



الف -  $s=5\%$



ب -  $s=50\%$

شکل 6 منحنی‌های هم‌تراز تغییرات تنش برشی وارد بر بستر برحسب  $10000 \text{ N/m}^2$

در شکل 6- ب تنش‌های برشی وارد بر بستر در ناحیه اطراف آبشکن با درصد استغراق 50% نشان می‌دهد که تنش برشی حداکثر وارد بر بستر در ناحیه برخورد جریان ریزشی در پایین‌دست آبشکن اتفاق می‌افتد و مقدار آن کمتر از حداکثر مقدار اندازه‌گیری شده در نوک بالادست آبشکن با درصد استغراق کم می‌باشد.

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، روش‌های متفاوت دیگری نیز برای تخمین تنش برشی وارد بر بستر وجود دارد. طبق نظر سولسبای و دایر (1981) ارتباط خطی بین تنش برشی وارد بر بستر و انرژی جنبشی آشفته‌گی وجود دارد که برای تخمین تنش برشی وارد بر بستر می‌توان از روابط (6 و 7) استفاده کرد.

### 3-2-2- تخمین تنش‌های برشی وارد بر بستر

بررسی تنش‌های برشی وارد بر بستر می‌تواند از طریق تنش‌های برشی رینولدز، انرژی جنبشی آشفته‌گی و نوسانات مؤلفه عمودی سرعت انجام شود. از این رو در این مقاله به بررسی تغییرات تنش برشی بدست آمده از این روش‌ها پرداخته شده است. از دیدگاه آماری تنش‌های رینولدز میانگین وزنی تمام پدیده‌های چهارگانه آشفته‌گی (اندرکنش رو به بیرون، اندرکنش رو به داخل، بیرون رانی و جاروبی) می‌باشد و از نظر هیدرودینامیکی تنش‌های رینولدز بخش کننده مومنتم بوده و برای تخمین تنش‌های برشی وارد بر بستر نیز استفاده می‌شوند. از این رو از این پارامتر آشفته‌گی برای تعیین نقاط مستعد آبشستگی استفاده می‌شود.

تحقیقات بایرون و همکاران در سال 2004 نشان داده است که استفاده از تنش‌های رینولدز نزدیک بستر بخوبی می‌تواند مناطقی را که دارای پتانسیل زیاد آبشستگی هستند، شناسایی کرده و همبستگی این پارامترها با تنش‌های برشی بستر به اثبات رسیده است. از آنجایی که تنش‌های برشی مثبت (در جهت محورها) و تنش‌های برشی منفی (خلاف جهت محورها) هر دو در انتقال رسوبات تأثیرگذار می‌باشند و از سویی دیگر تنش‌های برشی در جهت شعاعی و مماسی نیز می‌توانند موجب انتقال رسوبات شوند. روابط (3 تا 5) برای تخمین تنش برشی وارد بر بستر توسط دی و بارباهویا (2006) ارائه شده‌اند.

$$\tau_b = \sqrt{(\tau_b^r)^2 + (\tau_b^\theta)^2} \quad (3)$$

$$\tau_b^r = -\rho \overline{(u'_\theta u'_r + u'_\theta w')} \quad (4)$$

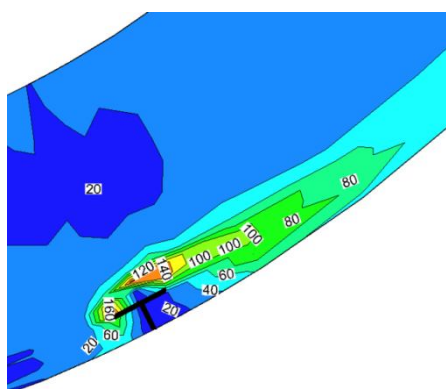
$$\tau_b^\theta = -\rho \overline{(w' u'_r + u'_\theta u'_r)} \quad (5)$$

در روابط بالا اندیس‌های  $r$ ,  $\theta$  به ترتیب مربوط به مؤلفه‌های شعاعی و مماسی می‌باشند.

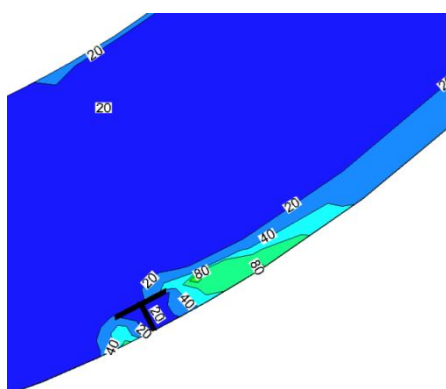
شکل 6 نشان دهنده تنش برشی وارد بر بستر برای جریان عبوری از اطراف دو آبشکن مورد بررسی می‌باشد.

در شکل 6- الف تنش برشی وارد بر بستر در ناحیه قرارگیری آبشکن به شدت افزایش می‌یابد، این افزایش در نوک بالادست آبشکن شدت بیشتری داشته و در لایه برشی شکل گرفته در اطراف آبشکن امتداد می‌یابد؛ البته





الف- آبشکن با درصد استغراق s=5%



ب- آبشکن با درصد استغراق s=50%

شکل 7 منحنی‌های هم‌تراز انرژی جنبشی آشفتگی بر حسب  $\text{cm}^2/\text{s}^2$

مقایسه بین مقادیر حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی در نوک بالادست آبشکن با درصد استغراق  $s=5\%$  و در محل پایین‌دست آبشکن با درصد استغراق  $s=50\%$  نشان می‌دهد که انرژی جنبشی آشفتگی در نوک بالادست آبشکن با درصد استغراق  $s=5\%$  بیشتر از انرژی جنبشی آشفتگی در پایین‌دست آبشکن با درصد استغراق  $s=50\%$  می‌باشد. تحقیقات انجام شده توسط محققان نشان داده است که نویزهای موجود در سری زمانی داده‌های برداشت شده برای مؤلفه عمقی سرعت توسط دستگاه سرعت‌سنج نقطه ای صوتی به مراتب کمتر از جهت‌های دیگر می‌باشد؛ از این رو محققان برای تخمین تنش برشی وارد بر بستر از نوسانات عمودی سرعت استفاده کرده‌اند و نشان داده‌اند که تنش‌های برشی وارد بر بستر تابعی خطی از نوسانات مؤلفه عمودی سرعت می‌باشند (کیم و همکاران 2000). شکل 8 نشان دهنده منحنی‌های هم‌تراز نوسانات مؤلفه

$$\tau_{TKE} = 0.5c\rho(TKE) \quad (6)$$

$$TKE = 0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (7)$$

که در این روابط  $\rho$  چگالی آب،  $TKE$  انرژی جنبشی آشفتگی و  $u'$  نوسانات سرعت در راستای مماسی،  $v'$  نوسانات سرعت در راستای شعاعی،  $w'$  نوسانات سرعت در راستای عمقی و  $\tau_{TKE}$  تخمین تنش برشی وارد بر بستر با استفاده از انرژی جنبشی آشفتگی است.

از رابطه فوق در بسیاری از تحقیقات پیشین، بخصوص در جریان‌های دریایی استفاده شده است (کیم و همکاران 2000). طبق تحقیقات کیم و همکاران (2000) ضریب  $c=0.19$  برای جریان‌های دریایی ارائه شده است، اما در مورد جریان‌های درون رودخانه‌ها تحقیقات چندانی در این مورد انجام نشده است و این ضریب برای جریان‌های درون رودخانه‌ها مناسب‌سازی نشده است. اگر چه در این روش محاسبه تنش برشی وارد بر بستر پدیده‌های چهارگانه آشفتگی بصورت مستقیم دخالت ندارند، اما لازم به ذکر است که طبق تحقیقاتی که در مورد ارتباط بین انرژی جنبشی آشفتگی نزدیک بستر و پدیده‌های چهارگانه آشفتگی انجام شده است، پدیده جاروبی بیشترین سهم را در ایجاد انرژی جنبشی آشفتگی دارد (سولسبای و دایر 1981). از آنجا که هنوز ضریب  $c$  در رابطه با جریان‌های رودخانه‌ای کالیبره نشده است شکل‌های 7 تنها نشان دهنده تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی در لایه نزدیک بستر می‌باشند.

در شکل 7- الف ناحیه بیشترین انرژی جنبشی آشفتگی در لایه نزدیک بستر مربوط به ناحیه نوک بالادست آبشکن و ناحیه‌ای است که در مرز بین جریان برگشتی و جریان اصلی که لایه برشی می‌باشد، گسترش یافته است. در این ناحیه بیشترین انرژی جنبشی آشفتگی در نوک بالادست آبشکن اتفاق می‌افتد. شکل 7- ب نشان دهنده انرژی جنبشی آشفتگی در لایه نزدیک بستر و اطراف آبشکن با درصد استغراق  $s=50\%$  می‌باشد. در این آبشکن در لایه برشی میزان انرژی جنبشی آشفتگی نسبت به مناطق مجاور آن بیشتر بوده و بیشترین میزان انرژی جنبشی آشفتگی در ناحیه پایین‌دست آبشکن و در محل برخورد جریان عبوری از روی تاج آبشکن بر روی بستر مشاهده می‌شود.

### 3-2-3- تغییرات زوایای اعمال پدیده‌های بیرون رانی و جارویی

زوایای اعمال پدیده‌های بیرون رانی و جارویی نیز یکی از عوامل تعیین کننده در میزان نیروهای مماسی و عمودی وارد بر بستر می‌باشند. برای تعیین زوایای اعمال پدیده‌های بیرون رانی و جارویی می‌توان از رابطه (8) استفاده کرد (میانایی و کشاورزی 2008).

$$\gamma_i = \frac{1}{n_i} \sum_{t=0}^T t g^{-1} \left( \frac{w'_i}{u_i} \right) \quad (8)$$

که در این رابطه  $i$  نمایش دهنده شماره پدیده مورد نظر،  $n$  تعداد داده‌های پدیده مورد نظر،  $w'_i$  نوسانات عمقی سرعت و  $u'_i$  نوسانات مؤلفه مماسی سرعت می‌باشد. شکل 9 نشان دهنده تغییرات زوایای اعمال پدیده‌های جارویی و بیرون رانی در نزدیک بستر در مقاطع مختلف برای دو آبشکن بررسی شده می‌باشد. در فواصل دور از آبشکن با کاهش میزان تأثیرات آبشکن بر میدان جریان تغییرات چندانی در زوایای اعمال این پدیده‌ها مشاهده نمی‌شود، اما در مقاطع نزدیک به آبشکن، بخصوص در مناطقی که جریان برگشتی در بالادست و پایین دست آبشکن مشاهده می‌شود، زوایای اعمال پدیده‌ها با افزایش احتمال ایجاد پدیده‌های اندرکنشی افزایش می‌یابد. این روند نشان دهنده این است که در این محدوده بسته‌های سیال با زاویه بیشتر عمودی نسبت به افق به بستر برخورد می‌کنند. در مناطق نزدیک به ساحل داخلی نیز زوایای اعمال پدیده‌ها در طول و برای دو آبشکن مورد بررسی تغییر چندانی ندارد.

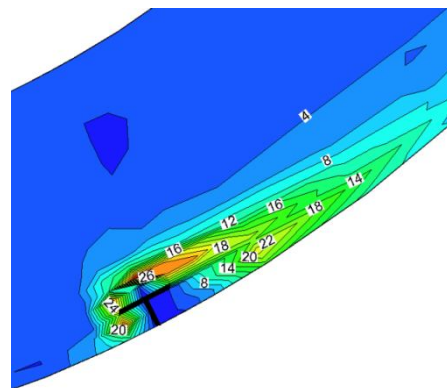
### 3-2-4- ماتریس پایداری و تبدیل پدیده‌ها

علاوه بر احتمال وقوع هر کدام از پدیده‌های آشفته‌گی و زوایای اعمال پدیده‌ها، پایداری و تداوم آنها در طول زمان نیز می‌تواند در مشخص ساختن پدیده‌های غالب و نیز ارتباط آنها با فرآیند انتقال رسوب مهم باشد. تبدیل پدیده  $i$  در زمان  $t$  به پدیده  $j$  در زمان  $t+\Delta t$  در طول مدت زمان برداشت داده‌ها ( $T$ ) از رابطه (9) تعیین می‌شود (Mianaei and Keshavarzy, 2008).

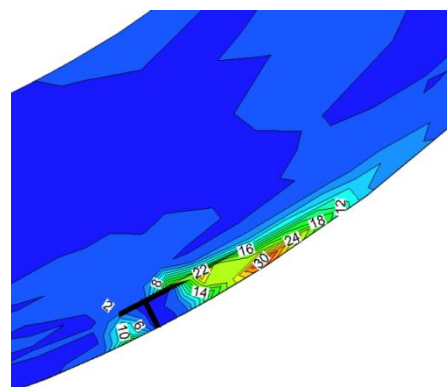
$$p_{ij} = \frac{n_{i(t) \rightarrow j(t+\Delta t)}}{n_i} \times 100$$

عمقی سرعت می‌باشد. برای هر دو آبشکن با درصد استغراق زیاد و کم، روند تغییرات نوسانات مؤلفه عمودی سرعت با تغییرات انرژی جنبشی آشفته‌گی که در شکل 7 بررسی شد، یکسان می‌باشد؛ به این ترتیب که مقدار حداکثر آن برای آبشکن با درصد استغراق  $s=5\%$  در نوک بالادست آبشکن و برای آبشکن با درصد استغراق  $s=50\%$  در ناحیه برخورد جریان ریزشی عبوری از تاج آبشکن با بستر می‌باشد.

مقایسه مقادیر حداکثر بین دو آبشکن نشان می‌دهد که این مقادیر با یکدیگر قابل مقایسه می‌باشند و می‌توان به این نتیجه رسید که با توجه به رابطه خطی بین تنش برشی وارد بر بستر و نوسانات مؤلفه عمودی سرعت، تنش برشی حداکثر وارد بر بستر در اطراف آبشکن با درصد استغراق زیاد در پایین دست و در آبشکن با درصد استغراق کم در نوک بالادست آبشکن اتفاق می‌افتد.



الف- آبشکن با درصد استغراق  $s=5\%$



ب- آبشکن با درصد استغراق  $s=50\%$

شکل 8 منحنی‌های هم‌تراز نوسانات مؤلفه عمقی سرعت

نزدیک به ساحل داخلی و دیگری در محل جریان برگشتی در پایین دست آبشکن انتخاب شده و به بررسی آنها پرداخته می‌شود. شکل‌های 10 و 11 نمایش دهنده ماتریس‌های مورد نظر در این نقاط می‌باشند.

$\begin{bmatrix} 51 & 23 & 12 & 13 \\ 23 & 51 & 13 & 12 \\ 7 & 19 & 41 & 33 \\ 10 & 1 & 14 & 75 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 40 & 17 & 5.4 & 36 \\ 18 & 70 & 36 & 5.9 \\ 8 & 25 & 46 & 20 \\ 8.3 & 5.3 & 17 & 66 \end{bmatrix}$
الف - $(r, \theta) = (30, 35^\circ)$	ب - $(r, \theta) = (13, 43.75^\circ)$
$\begin{bmatrix} 39 & 19 & 9 & 31 \\ 18 & 62 & 10 & 9 \\ 8 & 33 & 34 & 25 \\ 11 & 10 & 19 & 60 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 85 & 10 & 1 & 4 \\ 8 & 83 & 8 & 1 \\ 1 & 8 & 83 & 8 \\ 5 & 3 & 5 & 87 \end{bmatrix}$
ج - $(r, \theta) = (6, 46.25^\circ)$	د - $(r, \theta) = (45, 46.25^\circ)$

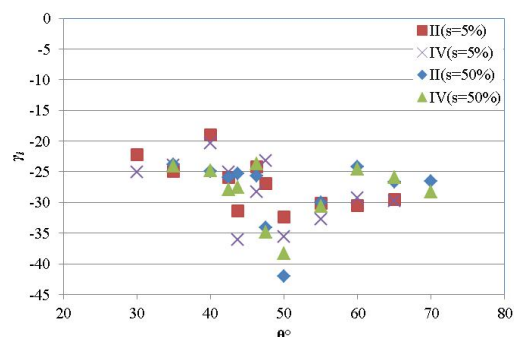
شکل 10 تغییرات  $P_{ij}$  در نقاط مختلف برای  $s=5\%$

$\begin{bmatrix} 40 & 19 & 6 & 36 \\ 19 & 58 & 10 & 11 \\ 7 & 26 & 39 & 26 \\ 7 & 11 & 20 & 62 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 38 & 17 & 8 & 36 \\ 21 & 64 & 6 & 6 \\ 8 & 34 & 42 & 15 \\ 8 & 7 & 20 & 64 \end{bmatrix}$
الف - $(r, \theta) = (30, 35^\circ)$	ب - $(r, \theta) = (13, 43.75^\circ)$
$\begin{bmatrix} 32 & 19 & 9 & 39 \\ 17 & 62 & 10 & 9 \\ 11 & 30 & 34 & 25 \\ 11 & 10 & 19 & 60 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 84 & 8 & 1 & 6 \\ 6 & 83 & 9 & 0.5 \\ 1 & 8 & 82 & 8 \\ 6 & 0.1 & 5 & 88 \end{bmatrix}$
ج - $(r, \theta) = (6, 46.25^\circ)$	د - $(r, \theta) = (45, 46.25^\circ)$

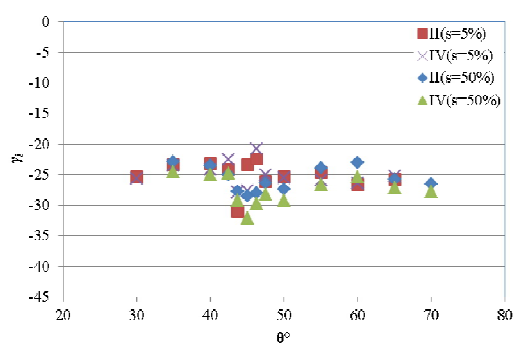
شکل 11 تغییرات  $P_{ij}$  در نقاط مختلف برای  $s=50\%$

مطابق ماتریس‌های ارائه شده، بیشترین احتمال ایجاد تبدیل پدیده‌ها به یکدیگر مربوط به پایداری پدیده‌ها می‌باشد؛ بطوری که در تمام ماتریس‌ها و نقاط بررسی شده که به‌عنوان نمونه تعدادی از آنها در شکل‌های 10 و 11 ارائه شده‌اند، مقادیر بر روی قطرهای اصلی بیشترین احتمال را دارند. لذا می‌توان انتظار داشت که پایداری آن در زمان بعد، بیشترین احتمال را داشته باشد. در شرایطی که تبدیل پدیده‌های بیرون‌رانی به جاروبی (II به IV) و برعکس و نیز تبدیل پدیده‌های اندرکنش رو به بیرون به پدیده اندرکنش رو به داخل (I به III) و برعکس، کمترین احتمال تبدیل پدیده‌ها را دارند، درایه‌های روی قطر اصلی

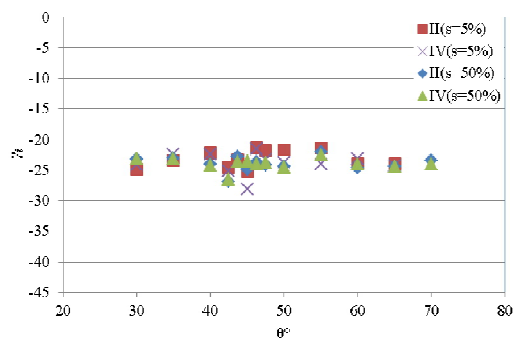
$$n_i = \sum_{j=1}^4 \sum_{t=0}^T n_{i(t) \rightarrow j(t+\Delta t)} \quad (9)$$



الف -  $r=4 \text{ cm}$



ب -  $r=13 \text{ cm}$

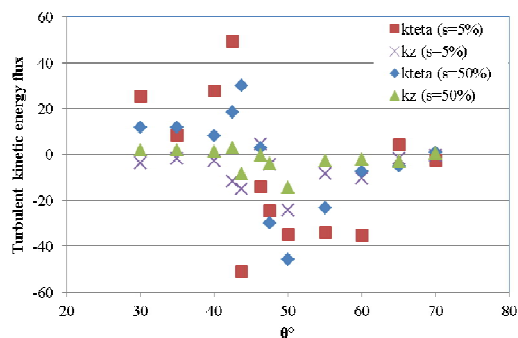


ج -  $r=40 \text{ cm}$

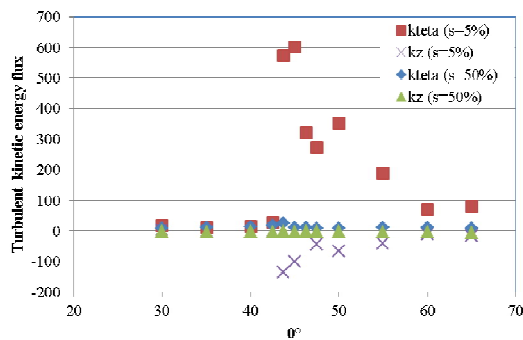
شکل 9 تغییرات زوایای اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در مقاطع مختلف  $(u'w')$  (فاصله شعاعی تا ساحل خارجی)

برای نشان دادن مقادیر احتمال تبدیلات و پایداری پدیده‌ها در هر نقطه از ماتریسی  $4 \times 4$  استفاده می‌شود که درایه موجود در سطر  $i$  و ستون  $j$   $P_{ij}$  می‌باشد. برای این منظور چهار نقطه یکی در بالادست و دور از آبشکن، در نزدیک نوک بالادست آبشکن، در محل قرارگیری آبشکن و

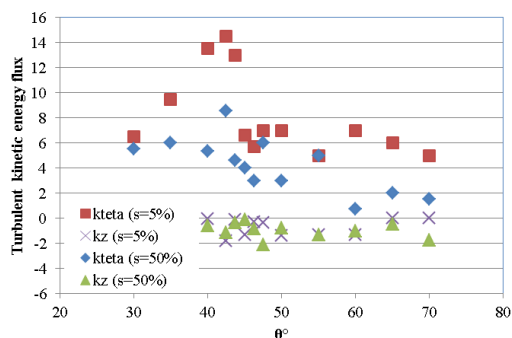
بالادست مشاهده شد، با این تفاوت که در مقطع قرارگیری بال آبشکن روند بالادست آن ادامه دارد. در پایین دست آبشکن با  $s=50\%$  نیز روندی کم و بیش مشابه آبشکن با درصد استغراق  $s=5\%$  مشاهده می‌شود. در شکل 12-ب تغییرات شار انرژی آشفته‌گی لایه نزدیک بستر در  $r=13$  cm برای دو آبشکن مورد بررسی ارائه شده است.



الف -  $r=4$  cm



ب -  $r=13$  cm



ج -  $r=40$  cm

شکل 12 تغییرات شار انرژی آشفته‌گی ر مقاطع مختلف  $(u'w')$  (فاصله شعاعی تا ساحل خارجی)

ماتریس پایداری و تبدیل در نقاط قرار گرفته در محل جریان بازگشتی در پایین دست هر دو آبشکن بررسی شده (شکل‌های 10-ج و 11-ج) مقادیر بزرگی داشته که نشان دهنده پایداری زیاد پدیده‌ها در این منطقه از جریان می‌باشد.

### 3-2-5- شار انرژی جنبشی آشفته‌گی

شار انرژی جنبشی آشفته‌گی همانند پارامترهای همبستگی‌های درجه 3 علامت نوسانات سرعت را حفظ می‌کند، از این رو می‌تواند در تعیین پدیده غالب چهارگانه مورد استفاده قرار گیرد. از سویی دیگر این پارامتر نشان دهنده مجموع شار تنش‌های رینولدز عمودی در جهت مختلف می‌باشد. شار انرژی آشفته‌گی در راستای مماسی و عمقی را می‌توان از روابط (10 و 11) محاسبه کرد (بی و همکاران).

$$Ek_{\theta} = 0.5 \left( \overline{u_{\theta}^3} + \overline{u_{\theta}' u_r'^2} + \overline{u_{\theta}' w'^2} \right) \quad (10)$$

$$Ek_z = 0.5 \left( \overline{w' u_{\theta}^2} + \overline{w' u_r'^2} + \overline{w'^3} \right) \quad (11)$$

که در این روابط  $Ek_z$  و  $Ek_{\theta}$  به ترتیب شار انرژی جنبشی آشفته‌گی در راستای مماسی و عمقی است.

شکل 12 نشان دهنده تغییرات شار انرژی آشفته‌گی در جهت طولی و عمقی در مقاطع مختلف، برای دو آبشکن مورد بررسی می‌باشد. بطور کلی می‌توان گفت که شار انرژی آشفته‌گی در راستای مماسی بیشتر از راستای عمقی می‌باشد. شار انرژی آشفته‌گی در جهت مماسی و عمقی در نواحی بالادست و دور از آبشکن ضعیف بوده، اما با نزدیک شدن به محل قرارگیری آبشکن، مقدار آن تغییرات زیادی می‌کند. در شرایطی که  $s=5\%$  می‌باشد، در بالادست آبشکن و در مقاطع نزدیک به جان آبشکن شار انرژی آشفته‌گی در جهت طولی مثبت بوده و در جهت عمقی مقدار کمی منفی می‌باشد. در مقطع قرارگیری نوک بالادست آبشکن مقدار شار انرژی آشفته‌گی در جهت مماسی منفی و در جهت عمقی نیز منفی می‌باشد. در پایین دست آبشکن با  $s=5\%$  و در منطقه جریان برگشتی تشکیل شده در پایین دست آبشکن، شار انرژی آشفته‌گی در جهت مماسی و عمقی زیاد بوده و مقادیر منفی دارند. برای آبشکن در حالت  $s=50\%$  شرایط یکسانی در

ساحل داخلی توسعه می‌یابد.

تحقیقات انجام شده توسط شریعت زاده (1390) نشان داده است که در مراحل ابتدایی آبستنگی، در شرایطی که استغراق آبشکن  $s=50\%$  می‌باشد، آبستنگی در پایین-دست آبشکن به سبب جریان بازگشتی و برخوردی به بستر در پایین‌دست آبشکن شکل می‌گیرد، بطوری که مقداری از رسوبات از پایین‌دست به بدنه آبشکن منتقل شده و تراز بستر تا ارتفاع تاج قرار گیری آبشکن بالا می‌آید.

با توجه به برداشت‌های میدان جریان در لایه نزدیک بستر که در این تحقیق انجام شد، می‌توان در مورد ارتباط میدان جریان و فرایند آبستنگی بحث کرد. با توجه به اینکه شروع آبستنگی از نوک بالادست آبشکن آغاز شده و توسعه حفره آبستنگی در حد فاصل بین جریان اصلی و جریان بازگشتی در پایین‌دست آبشکن انجام می‌شود، می‌توان این روند را مربوط به افزایش تنش برشی وارد بر بستر در نوک بال بالادست آبشکن دانست؛ به این ترتیب که با استفاده از هر سه روش مورد مطالعه در این تحقیق، حداکثر تنش برشی وارد بر بستر در نوک بال بالادست آبشکن با درصد استغراق  $s=5\%$  ایجاد شد.

ناحیه‌ای پر تنش در لایه برشی شکل گرفته بین میدان جریان اصلی و جریان برگشتی در پایین‌دست آبشکن مشاهده می‌شود که می‌تواند عامل اصلی در انتقال رسوبات از این ناحیه و ایجاد آبستنگی در این ناحیه باشد. از سویی دیگر شار انرژی آشفتگی در ناحیه نزدیک آبشکن در مقطعی که از ساحل خارجی 13 cm فاصله دارد، بیشتر شده که در نتیجه آن و با توجه به علامت مثبت شار انرژی در راستای مماسی و منفی بودن آن در راستای عمقی می‌توان به این نتیجه رسید که انرژی جنبشی آشفتگی در این ناحیه به سمت پایین‌دست و بستر کانال می‌باشد. با توجه به اینکه شار انرژی جنبشی آشفتگی علامات نوسانات سرعت را نیز در درون خود حفظ می‌کند، می‌توان به این نتیجه رسید که در این ناحیه پدیده‌های جاروبی قوی اتفاق می‌افتد که موجب برداشته شدن رسوبات در این ناحیه و توسعه حفره آبستنگی در جهت طولی می‌شود. مقایسه بین قدرمطلق شار انرژی جنبشی

در بالادست و پایین‌دست آبشکن و در نقاط دور از آبشکن شار انرژی آشفتگی بسیار کوچک می‌باشد؛ در حالی که در نزدیک آبشکن شار انرژی آشفتگی، بخصوص در شرایطی که  $s=5\%$  می‌باشد، قابل توجه می‌باشد. در نزدیک آبشکن قدر مطلق شار انرژی آشفتگی در جهت مماسی و عمقی افزایش می‌یابد و این افزایش برای آبشکن با درصد استغراق کم ( $s=5\%$ ) بسیار بیشتر می‌باشد. در  $r=40\text{ cm}$  روندی مشابه در مورد شار انرژی آشفتگی در طول کانال مشاهده می‌شود و این روند برای هر دو آبشکن بررسی شده تقریباً یکسان می‌باشد.

در این مقطع شار انرژی جنبشی در طول کانال تغییرات کمی داشته و تنها در نزدیک محل قرارگیری آبشکن مقدار کمی افزایش دارد. مقادیر شار انرژی آشفتگی در راستای طولی برای آبشکن با درصد استغراق زیاد به مقدار کمی بیشتر می‌باشد. دلیل این مسأله را می‌توان بیشتر بودن جریان عبوری در راستای مماسی از کنار آبشکن با درصد استغراق کمتر دانست.

#### 4- ارتباط پدیده‌های آشفتگی و آبستنگی

با توجه به اینکه یکی از کاربردهای مهم برداشت میدان جریان برقراری ارتباط و بررسی همبستگی با روند آبستنگی در اطراف سازه‌ها می‌باشد؛ از این رو در این بخش به بحث و بررسی در این مورد پرداخته می‌شود. تحقیقاتی در دانشگاه تربیت مدرس در مورد آبستنگی ایجاد شده توسط جریان عبوری در اطراف آبشکن‌های با درصد استغراق  $s=5\%$  و  $s=50\%$  انجام شده است. بر طبق این تحقیقات که توسط خسروی (1390) و شریعت‌زاده (1390) انجام شده است، روند آبستنگی بصورت زیر می‌باشد. در شرایط تعادل نسبی حفره آبستنگی، ابعاد حفره آبستنگی ایجاد شده در اطراف آبشکن با درصد استغراق کم، بیشتر از آبشکن با درصد استغراق زیاد می‌باشد و نرخ زمانی آبستنگی در اطراف آبشکن با درصد استغراق زیاد کمتر از نرخ آبستنگی در آبشکن با درصد استغراق کم می‌باشد. از سویی دیگر شروع آبستنگی در اطراف آبشکن‌های با درصد استغراق زیاد و کم از نوک بال بالادست آبشکن می‌باشد و در اطراف آبشکن، بین بال و

روش مورد استفاده بود؛ بطوری که بیشترین تنش برشی وارد بر بستر در آبشکن با درصد استغراق کم، بیشتر از آبشکن با درصد استغراق زیاد می‌باشد و می‌تواند از عوامل بیشتر بودن آبشستگی در آبشکن با درصد استغراق کمتر باشد. احتمال پدیده‌های بیرون‌رانی و زوایای اعمال پدیده-های بیرون‌رانی و جاروبی در نواحی برگشت جریان بیشتر بود و می‌توان در این نواحی پدیده‌های اندرکنشی را به‌عنوان پدیده‌هایی که عامل ایجاد آبشستگی می‌باشند، در نظر گرفت.

### 6- فهرست علائم

$Ek$	شار انرژی جنبشی
$n_i$	مجموع تعداد پدیده‌ها
$P_{ij}$	درایه‌های تبدیل پدیده‌ها به یکدیگر
$p_i$	احتمال ایجاد پدیده‌ها
$S$	درصد استغراق آبشکن
$TKE$	انرژی جنبشی آشفته‌گی
$u'$	نوسانات سرعت در راستای مماسی
$v'$	نوسانات سرعت در راستای شعاعی
$w'$	نوسانات سرعت در راستای عمودی
$\gamma_i$	زوایای اعمال پدیده‌ها
$\rho$	جرم مخصوص سیال
$\tau_b$	تنش برشی وارد بر بستر
$\tau_b^r$	تنش برشی وارد بر بستر در راستای شعاعی
$\tau_b^\theta$	تنش برشی وارد بر بستر در راستای مماسی

### 7- منابع

خسروی مشیزی، م. (1390). "بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل مستغرق در قوس 90درجه". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

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". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

صفرزاده گندشمین، ا. (1389). "مطالعه آزمایشگاهی الگوی

در این ناحیه بین آبشکن با درصد استغراق زیاد و آبشکن با درصد استغراق کم نشان دهنده این موضوع است که قدرت پدیده‌های جاروبی در این ناحیه آبشکن با درصد استغراق کم بیشتر از آبشکن با درصد استغراق زیاد می‌باشد و این مطلب می‌تواند یکی از عوامل توسعه حفره آبشستگی در جهت طولی باشد.

باوجود اینکه زوایای اعمال پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در نزدیک آبشکن افزایش یافته و نیز احتمال ایجاد این پدیده‌ها کاهش یافته است، اما نرخ انتقال رسوب از این مناطق بیشتر می‌باشد. دلیل این موارد را می‌توان وجود جریان چرخشی در این ناحیه دانست؛ به این ترتیب که در ناحیه جریان چرخشی با توجه به علامت سرعت متوسط جریان، می‌توان پدیده‌های اندرکنشی اتفاق افتاده در این مناطق را در حکم پدیده‌های بیرون‌رانی و جاروبی در نظر گرفت، یعنی افزایش احتمال پدیده‌های اندرکنشی در این ناحیه، یا افزایش احتمال انتقال بسته‌های سیال با سرعت زیاد به سمت بستر و در نتیجه احتمال حرکت ذرات رسوب در این منطقه افزایش می‌یابد. همین روند در ناحیه آبشستگی شکل گرفته در پایین‌دست آبشکن با درصد استغراق زیاد مشاهده شد؛ به این ترتیب که در ناحیه جریان برگشتی در پایین‌دست، احتمال ایجاد پدیده‌های اندرکنشی بیشتر بوده و شار انرژی آشفته‌گی نیز نشان دهنده غالب بودن این پدیده است و با توجه به جریان برگشتی در این ناحیه می‌توان پدیده اندرکنشی غالب در این ناحیه را به‌عنوان عامل ایجاد آبشستگی در نظر گرفت.

### 5- نتیجه‌گیری

در این مقاله میدان جریان اطراف آبشکن T شکل مستغرق قرار گرفته در قوس 90 درجه برای دو درصد استغراق  $s=5\%$  و  $s=50\%$  مورد بررسی قرار گرفت و ارتباط و همبستگی آن با فرایند آبشستگی تحلیل شد. مطابق نتایج بدست آمده در این تحقیق، پدیده جاروبی در ناحیه لایه برشی قرار گرفته در اطراف آبشکن بسیار قوی بوده و قدرت این پدیده در شرایطی که آبشکن درصد استغراق کمتری دارد، بیشتر است. تخمین تنش‌های برشی وارد بر کف نشان دهنده روندی یکسان برای هر سه

- Eng, 128(1), 117–126.
- Hinze, J. O. (1975). *Turbulence*. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.
- Kim, H. T., Kline S. J. and Reynolds W. C. (1971). "The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer." *J. Fluid Mech.* 50, 133-160.
- Kuhnle, R. A. and Alonso, C. V. (2013). "Flow near a model spur dike with a fixed scoured bed." *Int. J. Sediment Res.* 28(3), 349-357.
- Kuhnle, R. A., Alonso, C. V. and Jia, Y. J. (2008). "Flow around a submerged trapezoidal spur dike test case." *J. Hydraul. Eng.* 128(12), 1087-1093.
- Leschziner, M. A. and Rodi, W. (1979). "Calculation of strongly curved open channel flow." *J. Hydraul. Div.* 105(10), 1297-1314.
- Mianaei, S. J. and Keshavarzy, A. R. (2008). "Spatio-temporal variation of transition probability of bursting events over the ripples at the bed of open channel." *Stoch. Environ. Res. Risk. Assess.* 22, 257–264
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). *Turbulene in open-channel flow*. IAHR Monograph Series, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- 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.
- Soulsby, R. L. and Dyer, K. R. (1981). "The form of the near-bed velocity profile in a tidally accelerating flow." *J. Geophysical Research*, 86, 8067-8074.
- Vaghefi, M. and Ghodsian, M. (2009). "Experimental study on the effect of a T-shaped spur dike length on scour in a 90° channel bend." *Arab. J. Sci. Eng.*, 34(2), 337-348.
- Vaghefi, M., Ghodsian, M. and Salehi Neyshabouri, S. A. A. (2012). "Experimental study on scour around a T-shaped spur dike in a channel bend." *J. Hydraul. Eng.* 138(5), 471–474.
- Yaeger, M. A. (2009). "Mean flow and turbulence around two series of experimental dikes." Msc Thesis, University of Arizona.
- جریان آشفته حول آبشکن با شکل‌های مختلف دماغه". رساله دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- فضلی، م. (1387). "مطالعه آزمایشگاهی الگوی آبشستگی پیرامون آبشکن مستقر در قوس 90 درجه". رساله دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- Bey, A., Faruque, M. and Balachandar, R. (2007). "Two-dimensional scour hole problem: role of fluid structures." *J. Hydr. Eng.*, 133(4), 414- 431.
- Biron, P., Robson, C., Lapoinet, M.F. and Gaskin, S.J. (2004). "Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields." *Earth Surf. Process. Landforms.* 29, 1403–1415.
- Camino, A., Zhu, D. and Rajaratnam, N. (2012). "Jet diffusion inside a confined chamber." *J. Hydraul. Res.* 50(1), 121–128.
- Carlos, M., Cantero, N., Nino, Y., and Garcia, H. (2005). "Turbulence measurements with acoustic doppler velocimeters." *J. Hydraul. Eng.* 131(12), 1062–1073.
- Coleman, S. E., Lauchlan, C. S. and Melville, B. W. (2003). "Clear-water scour development at bridge abutments." *J. Hydraul. Res.*, 41(5), 521-532.
- Dey, S. and Barbhuiya, A. K. (2006). "Velocity and turbulence in a scour hole at a vertical wall abutment." *Flow. Mea. Instru.* 17, 13–21.
- 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), 1717–1725.
- Duan, J. G., He, L., Wang, G. Q. and Fu, X. D. (2011). "Turbulent burst around experimental spur dike." *Int. J. Sediment. Res.* 26(4), 471-486.
- Elawady, E. and Mansanori, M. (2000). "Experimental study of flow behavior around submerged spur-dike on rigid bed." *Annual J. Hydraulic Eng.* 44, 539-544.
- Fazli, M, Ghodsian, M. and Salehi Neyshaboury, S. A. A. (2008). "Scour and flow field around a spur dike in a 90° bend". *Int. J. Sediment Res.* 23(1), 56-68.
- Goring, D. and Nikora, V. (2002) "Despiking acoustic doppler velocimeter data." *J. Hydraul.*