

# مطالعه آزمایشگاهی ساختار جریان آشفته در میدان دو آبشکن با

## روش PIV

ذوالفقار صفرزاده<sup>۱\*</sup>، اکبر صفرزاده<sup>۲</sup>

۱- مربی گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اردبیل

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

safarzadeh@iauardabil.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۴/۶/۸]

تاریخ دریافت: [۹۴/۱/۲۵]

**چکیده-** در این پژوهش میدان جریان بین دو آبشکن مستقیم واقع در جریان کم عمق یک کانال عریض با استفاده از روش سرعت-سنجی تصویری ذرات سطحی اندازه‌گیری شده است. بدین منظور آبشکن‌های مستقیم به طول ۲۵ سانتی‌متر در دو فاصله نسبی ۱ و ۲ در ناحیه جریان توسعه یافته کانالی به عرض ۱/۸ متر قرار داده شده و اندازه‌گیری میدان جریان، به منظور مطالعه الگوی جریان‌های چرخشی افقی، ساختار لایه اختلاطی و ناحیه چرخشی پایین دست انجام شده است. برای پردازش تصاویر از نرم افزار GPIV استفاده شده و از روش‌های وسترویل و الگوریتم تکراری برویس برای فیلتراسیون میدان‌های سرعت استفاده شده است. نتایج به صورت توزیع مقادیر متوسط سرعت، شدت‌های آشفتگی و تنش‌های رینولدز ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصله، به واسطه کم عمق بودن میدان، بخش عمده‌ای از ساختارهای آشفتگی حالت دوبعدی داشته و شکل‌گیری یک جریان برگشتی از ناحیه پایین دست به داخل میدان آبشکن باعث پیچیدگی ساختار لایه اختلاطی و در نتیجه پروسه تبادل جرم بین ناحیه چرخشی میدان آبشکن و جریان آزاد می‌شود.

**واژگان کلیدی:** جریان آشفته، لایه اختلاطی، سرعت سنجی تصویری ذرات سطحی، جریان برگشتی، ورتیسیته.

### ۱- مقدمه

آبشکن‌ها (W) به طول آنها (L) بوده و تحت عنوان نسبت طول معروف است. این ضریب به صورت  $\lambda=W/L$  نمایش داده می‌شود. شرایط مورفولوژیکی و به ویژه شرایط هیدرولوژیکی رودخانه می‌تواند منجر به تغییر تراز سطح آب نسبت به تراز تاج آبشکن شده و دو حالت میدان جریان مستغرق و غیر-مستغرق را ایجاد نماید. بیشتر مطالعات در حالت آبشکن‌های غیر مستغرق انجام شده است چرا که این حالت سناریوی غالب در بیشتر رودخانه‌ها بوده و از طرف دیگر، شرایط جریان در حالت غیر مستغرق نسبت به حالت مستغرق از پیچیدگی کمتری برخوردار بوده و مطالعه پدیده‌هایی مانند تبادل مومتم و یا جرم بین میدان آبشکن و جریان اصلی رودخانه در این حالت ساده‌تر است [۱].

آبشکن‌ها به عنوان یکی از مهمترین سازه‌های رودخانه‌ای، با اهدافی مانند حفاظت جداره رودخانه در مقابل فرسایش، تسهیل کشتیرانی از طریق ایجاد عمق جریان مناسب، ایجاد شرایط مناسب زیست محیطی برای آبزیان بیشتر به صورت گروهی ساخته شده و میدان جریان ایجاد شده در بین آنها به میدان آبشکن<sup>۱</sup> معروف است. ساختار جریان، الگوی گردابه‌های متوسط و لحظه‌ای و پارامترهای آشفتگی مانند انرژی جنبشی آشفتگی در میدان آبشکن تابعی از طول، چگونگی چیدمان، شرایط مورفولوژیکی و هیدرولوژیکی رودخانه است. مهمترین پارامتر در چگونگی چیدمان آنها نسبت فاصله بین

گرفته بین میدان آبشکن و جریان اصلی کانال پرداخت. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، مولفه طولی تنش رینولدز چندین برابر مولفه قائم است که این پدیده نشان از دوبعدی بودن آشفتگی در پلان و غلبه آن بر ساختارهای قائم دارد [۶]. برویس و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ میدان جریان ناشی از وجود گروه موانع جانبی در یک کانال باز عریض در حالت کم عمق را به صورت عددی شبیه‌سازی نمودند. مشخصه غالب جریان متوسط در میدان آبشکن، یک ناحیه چرخشی بزرگ و نواحی چرخشی متعدد کوچک است. در پژوهش مزبور، علاوه بر میدان سرعت، توزیع تنش برشی به صورت مقادیر متوسط زمانی و همچنین نوسانات آن برای بررسی پتانسیل آبشستگی نیز تحلیل شده است [۷]. بر اساس نتایج اغلب پژوهشگران، الگوی جریان غالب در گروه آبشکن‌ها، وابستگی زیادی به نسبت طول دارد به گونه‌ای که برای نسبت طول ۱، تنها یک ناحیه چرخشی در میدان آبشکن شکل گرفته ولی در حالت نسبت طول ۲، علاوه بر شکل گیری یک ناحیه چرخشی بزرگ، یک ناحیه چرخشی ثانویه نیز شکل می‌گیرد که ساختار آن به وسیله‌ی ناحیه چرخشی اصلی کنترل می‌شود [۵].

بر اساس نتایج آزمایشگاهی برویس (۲۰۰۹) و مک کوی و همکاران در سال ۲۰۰۸ توزیع عرضی تنش‌های رینولدز و همچنین شدت آشفتگی در جریان اصلی مقابل میدان آبشکن، علاوه بر لایه اختلاطی عمومی، یک لایه اختلاطی محلی نیز شکل می‌گیرد [۱]. ساختار جریان میدان سری آبشکن در حالت مستغرق به وسیله‌ی پژوهشگرانی چون اویجتوال (۲۰۰۵) و برویس در سال ۲۰۰۹ مطالعه شده و در تمامی این مطالعات به تغییر ساختار جریان چرخشی در محدوده آبشکن، به واسطه اندرکنش آن با لایه اختلاطی قائم ناشی از جریان عبوری از روی آبشکن بالادست اشاره شده است [۶].

میدان جریان بین دو آبشکن اولین بار به وسیله‌ی شن و ایکیدا در سال ۱۹۹۷ با هدف بررسی ناحیه چرخشی بعد از آبشکن پایین دست مطالعه شد [۸]. تومیناگا و همکاران در سال ۲۰۰۱ به بررسی تاثیر ارتفاع آبشکن بر میدان جریان مستغرق بین دو آبشکن پرداختند [۹]. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش،

با وجود اجرای سری آبشکن‌ها، مواردی وجود دارد که چه به واسطه شرایط اولیه ساخت و یا پدیده‌های رخ داده در حین بهره برداری، چیدمان سری آبشکن‌ها به هم خورده و میدان جریان بین دو آبشکن منفرد شکل می‌گیرد. در صورتی‌که تخریب یک یا چند آبشکن در حالت سری رخ دهد، شرایط چیدمان به هم خورده و دو آبشکن متوالی در این حالت امکان تشکیل یک میدان آبشکن منفرد را خواهند داشت. یکی از موارد کاربرد آبشکن‌ها، حفاظت کوله‌های پل با استفاده از دو آبشکن در طرفین پل است. در شکل ۱ نمونه‌ای از این حالت روی رودخانه راین نشان داده شده است. در این حالت نیز یک میدان آبشکن بین دو آبشکن شکل گرفته و شرایط جریان و هیدرودینامیک آن متفاوت با سری آبشکن خواهد بود. اویجتوال و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۱ و اویجتوال [۳] در سال ۲۰۰۵ به بررسی آزمایشگاهی میدان جریان در گروه آبشکن پرداخته و ضمن اندازه گیری سرعت سطحی، پروسه تبادل جرم بین میدان آبشکن و جریان اصلی رودخانه را مطالعه نمودند. وایبرخت و بیرکا در سال ۲۰۰۱ با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات سطحی، به مطالعه میدان جریان در گروه آبشکن در حالت جریان کم عمق پرداخته و مشخصات جریان متوسط و آشفته را ارائه نمودند [۴].



شکل ۱ استفاده از دو آبشکن برای حفاظت کوله پل روی رودخانه راین در استان بادن ووتنبرگ آلمان.

سوخودولف و همکاران (۲۰۰۲) به صورت اندازه‌گیری صحرایی و همچنین به روش آزمایشگاهی میدان جریان در محدوده آبشکن‌های رودخانه Elbe آلمان را بررسی نمودند [۵]. برویس (۲۰۰۹) الگوی جریان در لایه‌های مختلف و همچنین در صفحات قائم مختلف در میدان آبشکن با نسبت طول مختلف را با روش سرعت‌سنجی تصویری به کمک نور لیزر اندازه‌گیری نموده و به تحلیل ساختار لایه اختلاطی شکل

تبادل مومتم در حالت مستغرق بسیار بیشتر از حالت آزاد است. در بین پژوهش‌های موجود، در مطالعه عددی صورت گرفته به وسیله‌ی مک کوی و همکاران با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، جزئیات زیادی از ساختار جریان متوسط و لحظه‌ای بین دو آبشکن ارائه شده است [۱]. اما نقص عمده این پژوهش، عدم رعایت نسبت ابعاد در مقایسه با شرایط طبیعی است، به گونه‌ای که ارتفاع آبشکن و عمق جریان بسیار بیشتر از طول آبشکن در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، نسبت عرض به عمق کانال مورد نظر، شرایط جریان کم عمق را نداشته و نتایج قابل تعمیم به بسیاری از رودخانه‌های طبیعی نیست. ساختار لایه اختلاطی و به ویژه اندرکنش آن با ناحیه چرخشی پایین دست در هیچ کدام از مطالعات قبلی بررسی نشده و علاوه بر آن تفاوت‌ها و تشابه‌های الگوی جریان در میدان دو آبشکن با میدان سری آبشکن نیز تاکنون گزارش نشده است. در این پژوهش ضمن اندازه‌گیری میدان جریان بین دو آبشکن برای دو نسبت طول ۱ و ۲ در شرایط جریان کم عمق، میدان جریان متوسط و آشفته آن تحلیل شده و شباهت‌ها و تفاوت‌های میدان جریان با سری آبشکن به ازای شرایط هیدرولیکی و هندسی مشابه موجود در مراجع مقایسه شده است.

جدول ۱ مشخصات آزمایش جریان کم عمق حول دو آبشکن.

ردیف	مدل	W (cm)	B (cm)	Q (lit/s)	h (mm)	S <sub>0</sub> (degree)	U <sub>0</sub> (m/s)	Re	Fr
#۱		۲۵	۱۴۰	۱۳	۴۰	۰/۱	۰/۱۹	۲۸۰۰	۰/۲۹
#۲		۵	۱۸۰						

در جریان‌های کم عمق که هدف این پژوهش است، بخش عمده میدان جریان به صورت دو بعدی در پلان بوده و ویژگی‌های پایه‌ای و اساسی جریان را می‌توان تنها با اندازه‌گیری سرعت سطحی به دست آورد. روشی که به وسیله‌ی پژوهشگران رشته هیدرولیک برای سرعت‌سنجی این چنین جریان‌هایی ارائه شده است، به روش سرعت‌سنجی تصویری سطحی<sup>۱</sup> معروف است. در این روش به جای افزودن مواد ردیاب مستغرق در جریان به کل میدان، ذرات شناوری به سطح آب افزوده شده، و نیازی به هیچ منبع نوری مانند لیزر

تبادل مومتم در حالت مستغرق بسیار بیشتر از حالت آزاد است. در بین پژوهش‌های موجود، در مطالعه عددی صورت گرفته به وسیله‌ی مک کوی و همکاران با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، جزئیات زیادی از ساختار جریان متوسط و لحظه‌ای بین دو آبشکن ارائه شده است [۱]. اما نقص عمده این پژوهش، عدم رعایت نسبت ابعاد در مقایسه با شرایط طبیعی است، به گونه‌ای که ارتفاع آبشکن و عمق جریان بسیار بیشتر از طول آبشکن در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن، نسبت عرض به عمق کانال مورد نظر، شرایط جریان کم عمق را نداشته و نتایج قابل تعمیم به بسیاری از رودخانه‌های طبیعی نیست. ساختار لایه اختلاطی و به ویژه اندرکنش آن با ناحیه چرخشی پایین دست در هیچ کدام از مطالعات قبلی بررسی نشده و علاوه بر آن تفاوت‌ها و تشابه‌های الگوی جریان در میدان دو آبشکن با میدان سری آبشکن نیز تاکنون گزارش نشده است. در این پژوهش ضمن اندازه‌گیری میدان جریان بین دو آبشکن برای دو نسبت طول ۱ و ۲ در شرایط جریان کم عمق، میدان جریان متوسط و آشفته آن تحلیل شده و شباهت‌ها و تفاوت‌های میدان جریان با سری آبشکن به ازای شرایط هیدرولیکی و هندسی مشابه موجود در مراجع مقایسه شده است.

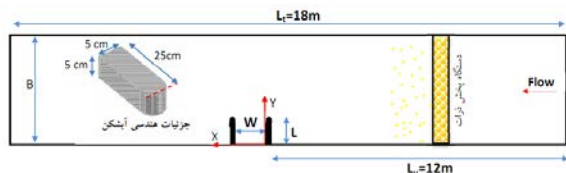
## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی و مشخصات آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در یک کانال مستقیم به عرض ۱/۸۰ متر و طول ۱۸ متر انجام شده است. این کانال شیب‌پذیر بوده و سیستم تغییر شیب آن به صورت کامپیوتری با دقت ۰/۱ درجه قابل تنظیم است. نمای کلی از کانال و تجهیزات جانبی آن در شکل ۲-الف نشان داده شده است.

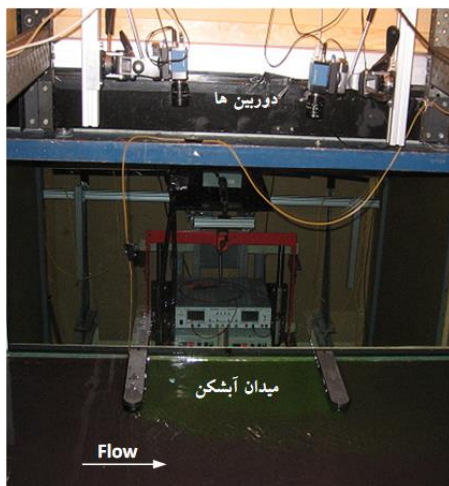
آبشکن‌های مورد نظر از جنس فلزی با روکش آلومینیومی بوده و مقطع آن به صورت مربعی با ابعاد ۵ سانتی‌متر است (شکل ۲-الف). طول آبشکن برابر ۲۵ سانتی‌متر انتخاب شده و عمود بر دیواره سمت راست کانال در فاصله ۱۲ متری از ورودی نصب شد. در فاصله مزبور جریان نزدیک شونده توسعه یافته

1 Surface Particle Image Velocimetry (SPIV)

است. بدین منظور از فیلتر میانه محلی<sup>۱</sup> ارائه شده به وسیلهی وسترویل (۲۰۰۵) و همچنین الگوریتم تکراری فیلتراسیون پیشنهادی برویس (۲۰۰۹) استفاده شده است [۹ و ۱۲].



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۲ (الف) جزئیات فلوم آزمایشگاهی و تعریف پارامترهای هندسی، (ب) چگونگی قرار گیری دوربین ها در محدوده میدان آبشکن، (ج) ذرات ردیاب مورد استفاده و (د) دستگاه پخش ذرات.

برای ایجاد صفحه روشن ندارد (اویجتوال و بویج، ۲۰۰۰) [۱۱]. مشخصه بارز جریان‌های کم عمق، شکل‌گیری جریان‌های چرخشی بزرگ مقیاس سطحی بوده بنابراین لازم است تا سیستم تصویر برداری و محدوده اندازه‌گیری به گونه‌ای باشد که این ساختارها در تصاویر برداشت شده ثبت شوند. بدین منظور در این پژوهش، یک سیستم سرعت‌سنجی تصویری ذرات سطحی شامل بخش سخت افزاری، پیش پردازش تصاویر، پردازش تصاویر برای تعیین میدان برداری، فیلتراسیون نتایج و در نهایت پس پردازش میدان برداری برای بررسی ساختارهای لحظه‌ای و نیز مکانی جریان آشفته حول مانع جانبی توسعه داده شده است. ذرات استفاده شده برای ردیابی، قطعات ورقه ای شش گوشه پلی استر طلایی رنگ با قطر ۲/۵ میلی‌متر و ضخامت ۰/۰۲۵ میلی‌متر است (شکل ۲-ج).

چگالی ذرات استفاده شده کمتر از چگالی آب بوده و به همین علت در سطح آب شناور می‌شوند. ذرات ردیاب استفاده شده در این پژوهش بسیار سبک بوده و برای پخش آنها روی سطح آب، از سیستم پخش که با استفاده از فشار باد کار می‌کند، استفاده شده است. تصویر سیستم پنوماتیک پخش ذرات روی کانال آزمایشگاهی، در شکل (۲-د) ارائه شده است. سیستم پخش ذرات در بالادست محدوده اندازه‌گیری به گونه‌ای نصب شد که ذرات ردیاب را با نرخ مشخصی و بصورت یکنواخت به سطح آب پخش کند. در این روش از سرعت‌سنجی تصویری، برای تامین نور کافی در محیط به گونه‌ای که ذرات ردیاب به خوبی به وسیلهی دوربین قابل تشخیص باشند، چهار عدد منبع نوری هالوژنی در کنار فلوم نصب شد.

برای ثبت تصاویر از دو عدد دوربین CCD مدل Procilica GE1910 با فرکانس تصویر برداری ۳۷ فریم بر ثانیه و رزولوشن ۹۰×۱۶۶۰ پیکسل استفاده شد. برای پردازش تصاویر از مجموعه برنامه‌ای که در محیط Matlab نوشته شده و همچنین نرم‌افزار GPIV در محیط سیستم عامل لینوکس استفاده شده است. برای پس پردازش داده‌ها، برنامه‌های مربوطه در محیط نرم افزار Matlab نوشته شده است. به منظور حذف داده‌های نادرست، داده‌های SPIV در چندین مرحله فیلتر شده

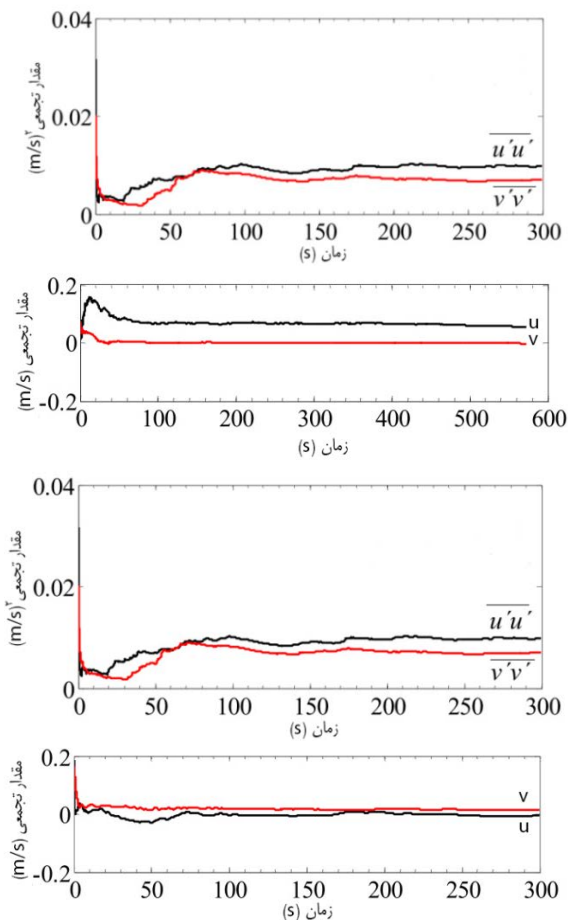
## ۳- ارائه نتایج

## ۳-۱- تعیین طول زمانی اندازه گیری

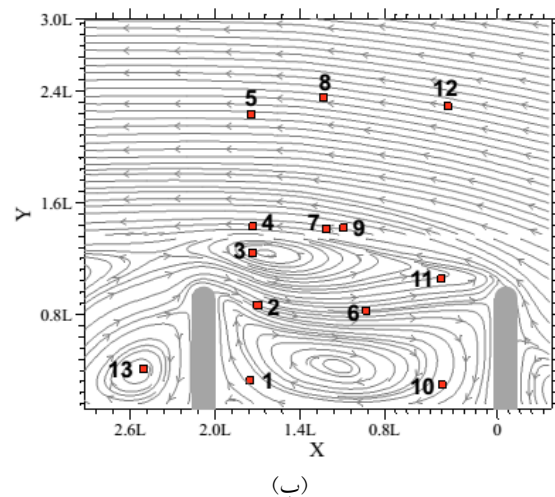
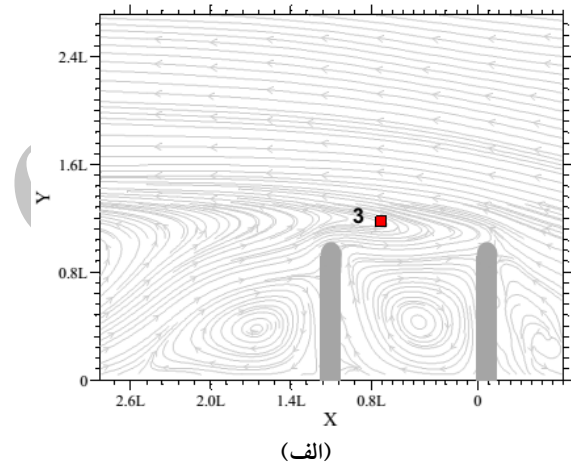
مشخصه بارز جریان‌های آشفته کم عمق، شکل گیری گردابه‌های بزرگ مقیاس سطحی است که فرکانس شکل گیری و حرکت آنها به مراتب کوچکتر از فرکانس گردابه‌های ریز آشفته‌گی است. بدین علت، طول زمان اندازه گیری در هر موقعیت، باید به شکلی باشد که برای ارضای شرط ایستایی سری‌های زمانی<sup>۱</sup>، تعداد کافی از این گردابه‌ها حین اندازه گیری ثبت شوند. بدین منظور، میدان جریان به مدت ۳۰۰ ثانیه اندازه گیری شده و خطوط جریان متوسط زمانی برای دو مدل در شکل ۳ ارائه شده است.

در این تصاویر محورهای افقی و قائم بر حسب طول آبشکن (L) تقسیم بندی شده‌اند. برای تعیین طول بازه زمانی مناسب برای اندازه گیری، نقاط مختلفی مطابق شکل ۳ در محدوده مورد نظر انتخاب شده و سری زمانی دو مولفه طولی (u) و عرضی (v) سرعت در این نقاط استخراج شد.

در ادامه، مقادیر متوسط زمانی مولفه‌های سرعت و همچنین تنش‌های نرمال رینولدز در نقاط مورد نظر در هر لحظه محاسبه شده و میانگین متحرک زمانی این پارامترها ترسیم شد. به عنوان نمونه در شکل ۴، سری زمانی مقادیر جمععی سرعت‌های میانگین و تنش‌های رینولدز نقطه ۳ برای دو آزمایش نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، مدت زمان ۳۰۰ ثانیه کاملاً برای محاسبه مقادیر ممان‌های اول و دوم میدان جریان کافی است. این شرایط برای تمامی نقاط نشان داده شده در شکل ۳ حاکم است.



شکل ۴ چگونگی همگرایی سری‌های زمانی مقادیر متوسط سرعت و تنش‌های نرمال رینولدز در نقطه ۳ (دو شکل بالا) نسبت طول  $\lambda = 1$  و (دو شکل پایین)  $\lambda = 2$ .



شکل ۳ خطوط جریان در محدوده میدان دو آبشکن (الف) نسبت طول

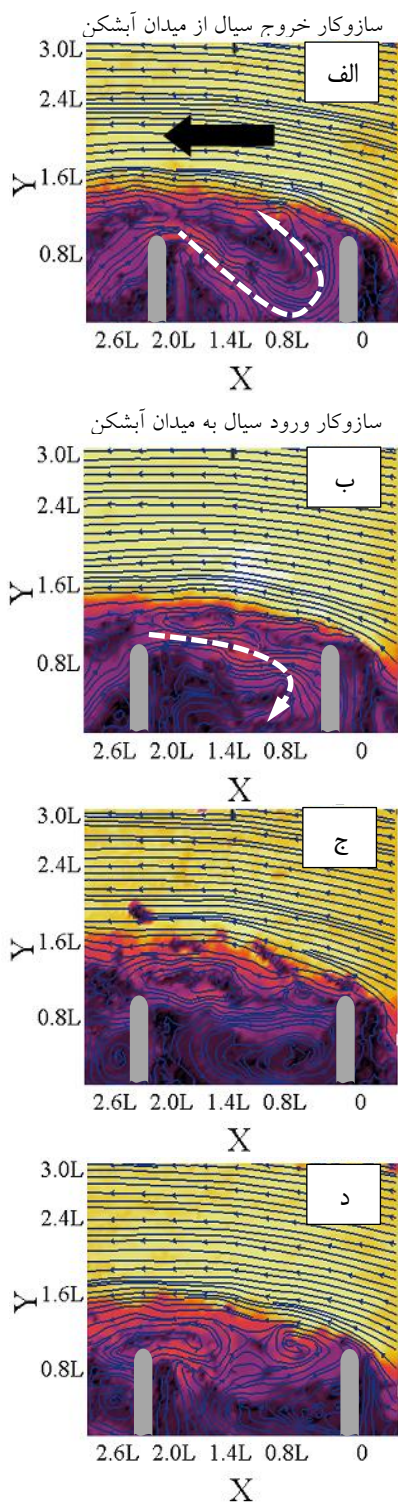
$$\lambda = 1 \text{ و } \lambda = 2 \text{ (ب)}$$

1 Time series stationarity



### ۲-۳- الگوهای لحظه‌ای جریان

لایه اختلاطی به سمت پایین دست می‌شود. با توجه به مطالب گفته شده، ناحیه چرخشی پایین دست و ورود جریان ناشی از آن به داخل لایه اختلاطی مقابل میدان آبشکن، نقش اصلی در تغییرات زمانی میدان جریان بین دو آبشکن دارد.



شکل ۵ میدان جریان لحظه ای در محدوده میدان دو آبشکن با نسبت طول

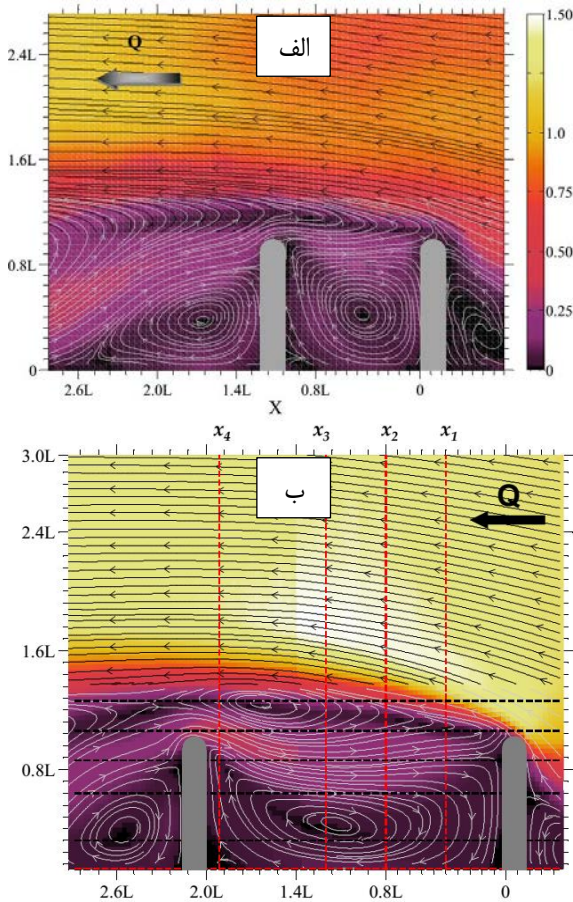
$\lambda = 2$  در لحظات (الف) ۳، (ب) ۸۱، (ج) ۱۱۸، (د) ۱۶۴.

در شکل ۵ تغییرات لحظه‌ای خطوط جریان به همراه توزیع برآیند سرعت بی بعد شده نسبت به سرعت جریان یکنواخت بالادست ( $U/U_0$ ) برای آزمایش  $\lambda = 2$  نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، از لحظه شروع، جریان از پایین دست شروع به ورود به داخل میدان آبشکن نموده و به تدریج به سمت بالادست گسترش می‌یابد تا به وجه پایین دست آبشکن اول برخورد کند. پس از برخورد، جریان تغییر جهت داده و به واسطه اندرکنش با جریان پرسرعت بیرونی، منجر به خروج بخشی از سیال داخل میدان آبشکن می‌شود (سازوکارهای خروج جرم از میدان آبشکن). ورود لحظه‌ای ساختارهای چرخشی از پایین دست به میدان آبشکن باعث به هم خوردن جریان چرخشی بین دو آبشکن شده و مقایسه الگوی جریان متوسط (شکل ۳-ب) با ساختارهای لحظه‌ای به خوبی نشانگر این پدیده است به گونه‌ای که در الگوی جریان متوسط، یک ناحیه چرخشی توسعه یافته در میدان آبشکن شکل گرفته است در حالیکه الگوهای لحظه‌ای در تمامی شکل‌ها نشان دهنده شکل‌گیری نواحی چرخشی کوچک، جریان رو به بیرون و بی نظمی‌های متعدد است.

با توجه به شکل (۵-ب) در لحظه ۸۱ ثانیه، جریان برگشتی وارد میدان آبشکن شده و ضمن برخورد با وجه پایین دست آبشکن اول باعث انتقال جرم از ناحیه پایین دست به داخل آبشکن و شکسته شدن ساختار ناحیه چرخشی در محدوده بین دو آبشکن می‌شود (سازوکار ورود سیال به داخل میدان آبشکن). در لحظه ۱۱۸ ثانیه (شکل ۵-ج) ناحیه چرخشی کل محدوده داخل آبشکن را اشغال نموده و دو ناحیه چرخشی کوچک در داخل لایه اختلاطی شکل گرفته است. با توجه به شکل (۵-د) به واسطه ورود جریان چرخشی لحظه ای از پایین دست به داخل میدان آبشکن، یکپارچی ناحیه چرخشی اصلی شکسته شده و ابعاد گردابه‌های داخل لایه اختلاطی افزایش می‌یابد. این پدیده نشانگر نوسانات لایه اختلاطی و تغییرات لحظه ای ضخامت آن است.

با خروج جریان از داخل میدان آبشکن، دوباره ناحیه چرخشی داخل میدان آبشکن توسعه یافته و باعث هدایت گردابه‌های

نیست. به همین علت، در نقطه  $X=2.6L$  از دیواره کانال جدا شده و باعث ایجاد ناحیه چرخشی ثانویه با جهت ساعتگرد در بین دیواره سمت چپ کانال و پشت آبشکن دوم می‌شود. ناحیه چرخشی اصلی تا دماغه آبشکن اول توسعه یافته و نفوذ چندانی به داخل میدان آبشکن ندارد. همان‌گونه که در تصاویر میدان جریان لحظه‌ای نشان داده شد، ساختارهای چرخشی لحظه‌ای در داخل لایه اختلاطی راستای پاد ساعتگرد داشته و اندرکنش آنها با سیال داخل میدان آبشکن باعث ایجاد ناحیه چرخشی ساعتگرد در میدان آبشکن شده است. بر اساس الگوی میدان متوسط، خروج جریان از میدان آبشکن از بخش پایین دست و نزدیک به دماغه آبشکن دوم رخ می‌دهد در حالیکه بر اساس نتایج میدان جریان لحظه‌ای، در برخی لحظات، خروج سیال از بخش بالادست میدان نیز اتفاق می‌افتد (شکل ۵-الف).



شکل ۶ میدان سرعت در محدوده میدان دو آبشکن (الف) نسبت طول  $\lambda = 1$  و (ب)  $\lambda = 2$ . مقادیر نسبت به سرعت جریان نزدیک شونده بی- بعد شده‌اند.

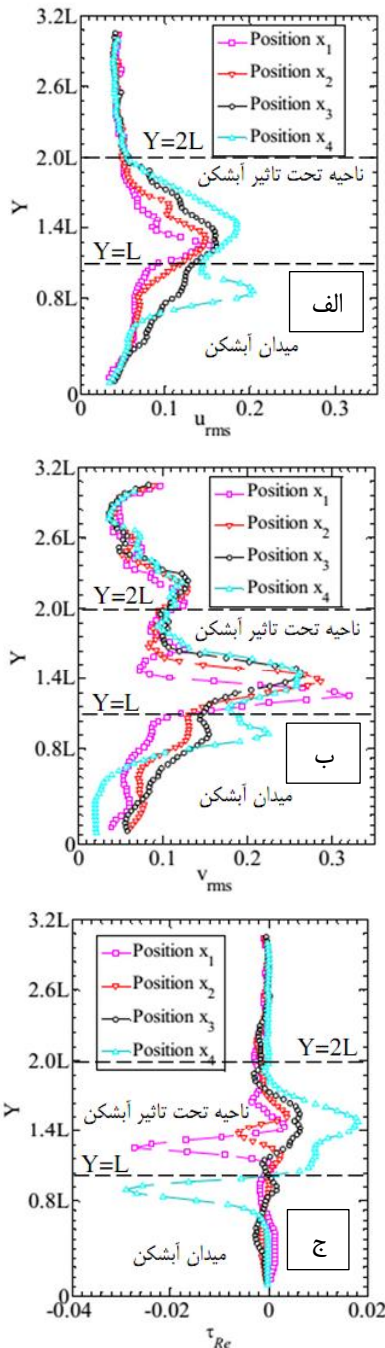
بطور کلی، اندرکنش لایه اختلاطی، جریان چرخشی پایین دست و ناحیه چرخشی بین دو آبشکن منجر به شکل‌گیری الگوهای مختلف جریان می‌شود. بر اساس تصاویر لحظه‌ای میدان جریان برای نسبت طول  $\lambda = 1$ ، میزان ورود جریان برگشتی پایین دست به داخل میدان بسیار کمتر از حالت  $\lambda = 2$  بوده و گردابه‌های لحظه‌ای ضمن ورود به ناحیه لایه اختلاطی، فقط به صورت برشی با ناحیه چرخشی داخل میدان تبادل مومتم و جرم می‌کنند. در بخش‌های آتی ضمن مقایسه ساختار جریان با حالت سری آبشکن، نقش ساختارهای دیگری همچون گردابه‌های جدا شده از دماغه آبشکن بالادست بر شکل‌گیری جریان داخل میدان آبشکن بحث خواهد شد.

### ۳-۳- میدان جریان و توزیع سرعت متوسط زمانی

در شکل ۶ میدان جریان متوسط زمانی به همراه توزیع سرعت میانگین بی‌بعد شده برای هر دو آزمایش نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶-الف در بالادست آبشکن اول به علت گرادیان معکوس فشار و جدایی جریان از دیواره سمت چپ کانال، یک ناحیه چرخشی شکل گرفته است که به واسطه سرعت بسیار پایین جریان در آن، می‌توان ناحیه مرده به آن اطلاق نمود. مرکز ناحیه چرخشی در نقطه‌ای به مختصات  $(X/L=-0.50, Y/L=0.25)$  واقع شده است. یک ناحیه چرخشی اصلی ساعتگرد در میدان آبشکن شکل گرفته و در راستای عرضی کل طول آبشکن را پوشش داده است.

مرکز ناحیه چرخشی  $(X/L=0.46, Y/L=0.43)$  در وسط میدان نبوده و کمی به سمت بالادست جابه‌جا شده است. سرعت جریان در داخل میدان به  $0.25$  سرعت جریان نزدیک شونده تقلیل یافته است. در پایین دست آبشکن دوم، دو ناحیه چرخشی شکل می‌گیرد. یک ناحیه چرخشی بزرگ پاد ساعتگرد مشابه ناحیه چرخشی پشت تک آبشکن ایجاد شده است که بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، طول آن معادل  $1.1$  برابر طول آبشکن است. جریان برگشتی ناشی از ناحیه چرخشی در امتداد دیواره کانال به واسطه کم عمق بودن جریان و آثار اصطکاک بستر، با حرکت به سمت بالادست مومتم خود را از دست داده و قادر به نفوذ تا وجه پایین دست آبشکن دوم

تغییرات عرضی هر سه پروفیل های مقطع  $x_4$  نشانگر وجود دو نقطه پیک است. همانطوریکه عنوان شد، پیک اول در داخل میدان آبشکن رخ می دهد. پیک دوم مربوط به لایه اختلاطی است.



شکل ۷ پروفیل پارامترهای مختلف آشفتگی در مقاطع مختلف عرضی داخل میدان آبشکن  $\lambda = 2$ . (الف)  $u_{rms}$ ، (ب)  $v_{rms}$  و (ج)  $\tau_{Re}$

با توجه به شکل های فوق، بر اساس الگوی تغییرات پارامترهای آشفتگی، از محل دماغه تا فاصله ای به اندازه یک برابر طول

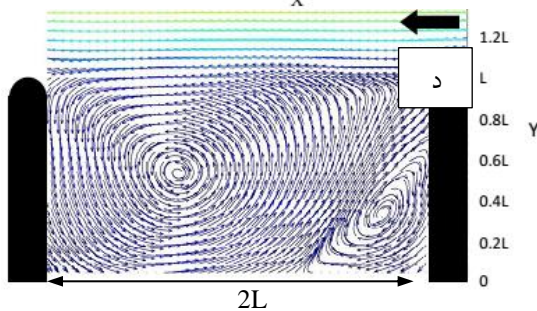
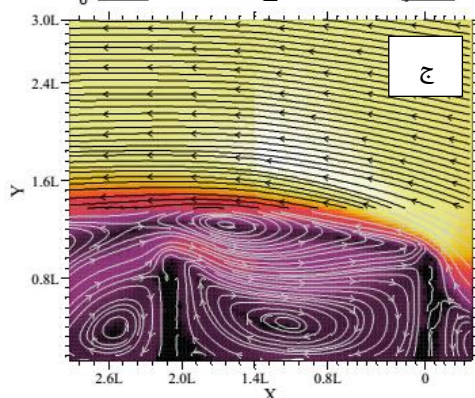
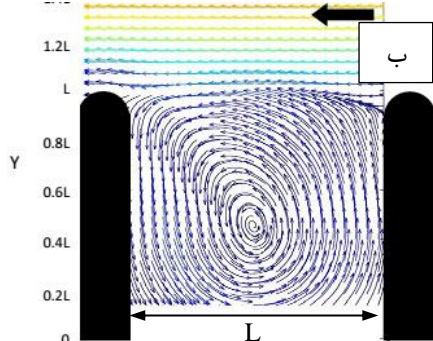
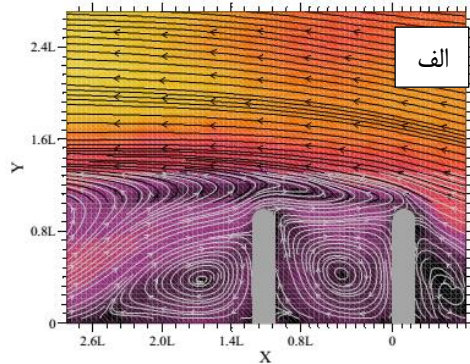
با توجه به شکل ۶-ب الگوی جریان متوسط در میدان آبشکن آزمایش  $\lambda = 2$  متفاوت با آزمایش  $\lambda = 1$  است. در این حالت به واسطه زیاد بودن فاصله بین آبشکن ها، جریان برگشتی از پایین دست، به داخل میدان آبشکن نفوذ نموده و باعث فشردگی جانبی ناحیه چرخشی اصلی تا موقعیت  $Y/L=0.8$  شده است. بر خلاف حالت نسبت طول ۱، یک ناحیه چرخشی بیضی شکل در داخل لایه اختلاطی شکل گرفته است که مرکز آن در نقطه  $(X/L=1.7, Y/L=1.28)$  قرار دارد. به همین علت، ضخامت لایه اختلاطی در این مدل، بیشتر از مدل اول است.

### ۳-۴- توزیع پارامترهای آشفتگی

در شکل ۷ توزیع عرضی پارامترهای مختلف آشفتگی در مقاطع عرضی مختلف واقع در میدان آبشکن  $\lambda = 2$  نشان داده شده است. موقعیت این مقاطع روی شکل ۶-ب) ارائه شده اند. این پارامترها جذر میانگین مربعات نوسانات طولی و عرضی و همچنین تنش رینولدز بی بعد شده است. با توجه به این شکل ها، در میدان آبشکن و در مقاطع عرضی  $x_1$  و  $x_3$  شدت نوسانات مولفه های طولی و عرضی با شیب تقریباً ثابتی از دیواره کانال به سمت دماغه افزایش می یابند ولی در مقطع  $x_4$  تا نیمه عرض میدان، شدت های آشفتگی و همبستگی نوسانات سرعت مقدار ناچیزی داشته و پس از آن با شیب تند به شدت افزایش و به یک مقدار ماکزیمم در موقعیت  $Y/L=0.9$  می رسند. این پدیده نشان از آشفتگی شدید جریان در ناحیه بالادست آبشکن دوم دارد. مقادیر پیک تنش رینولدز در هر دو مقطع  $x_1$  و  $x_4$  بصورت مقدار منفی است. بر اساس مطالعات برویس [۵] (۲۰۰۹) و روآدس و سوخودولف [۱۳] (۲۰۰۴) مقدار منفی عدد رینولدز ناشی از وجود جریان های چرخشی بوده به نحوی که در مقطع  $x_1$  عامل این پدیده، گردابه های کنده شده از دماغه آبشکن بالادست بصورت پدیده گردابه افشانی<sup>۱</sup> است در حالی که با توجه به شکل ۵، بالادست آبشکن دوم محل تجمع ساختارهای چرخشی لحظه ای می باشد که از ناحیه پایین دست، وارد میدان آبشکن می شوند.

1 Vortex shedding

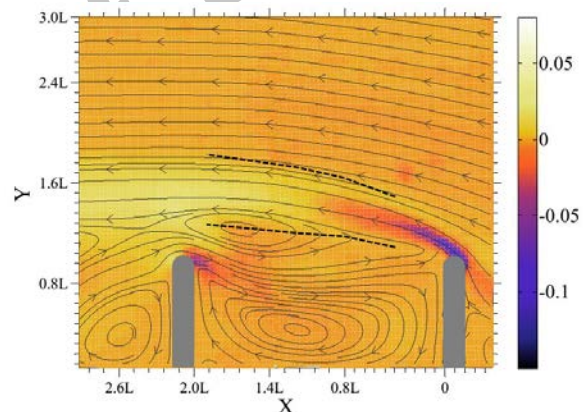




شکل ۸ مقایسه الگوی جریان در میدان دو آبشکن با میدان سری آبشکن ها (الف و ب) نسبت طول  $\lambda = 1$  و (ج و د)  $\lambda = 2$ .

در گروه آبشکن، تبادل مومتم بین جریان پرسرعت کانال و سیال داخل میدان آبشکن باعث چرخش پادساعتگرد سیال داخل میدان آبشکن می شود در حالی که، در آبشکن دوتایی، جریان برگشتی از پایین دست باعث ورود گردابه‌های متعدد با

آبشکن، تحت تاثیر آبشکن بوده و پس از آن، مقادیر شدت های آشفتگی و تنش رینولدز به طور محسوس افت می کنند به گونه ای که هیچ همبستگی بین مولفه های نوسانی طولی و عرضی سرعت در ناحیه  $Y > 2L$  مشاهده نمی شود. در کل طول لایه اختلاطی (مقاطع  $x_1$  الی  $x_4$ )، شدت آشفتگی عرضی، بیشتر از نوسانات طولی است که این نکته مبین نوسانات عرضی لایه اختلاطی است. در شکل ۷ توزیع تنش رینولدز در کل محدوده اندازه گیری مدل  $\lambda = 2$  نشان داده شده است. با توجه به شکل، دو ناحیه با تنش رینولدز زیاد در بالادست دماغه آبشکن اول و همچنین بالادست دماغه آبشکن دوم مشاهده می شود. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و عددی موجود این نواحی مستعد وقوع آبشستگی موضعی است که نتایج حاصل از توزیع تنش رینولدز نیز موید این پدیده است.



شکل ۷ توزیع تنش رینولدز ( $\tau_{Re}$ ) در آزمایش  $\lambda = 2$

#### ۴- مقایسه میدان جریان آبشکن دوتایی و گروه آبشکن ها

در شکل ۸ میدان جریان متوسط بین دو آبشکن با دو نسبت طول ۱ و ۲ به همراه میدان جریان گروه آبشکن برای شرایط جریان یکسان با آزمایش های انجام شده در این پژوهش نشان داده شده است. لازم به گفتن است که آزمایش های گروه آبشکن به وسیله ی برویس (۲۰۰۹) انجام شده است. شکل های ۸-الف و ۸-ب نشان می دهد که در هر دو حالت یک ناحیه چرخشی بین دو آبشکن متوالی تشکیل شده است، لیکن راستای چرخش دو ناحیه بر عکس هم است.

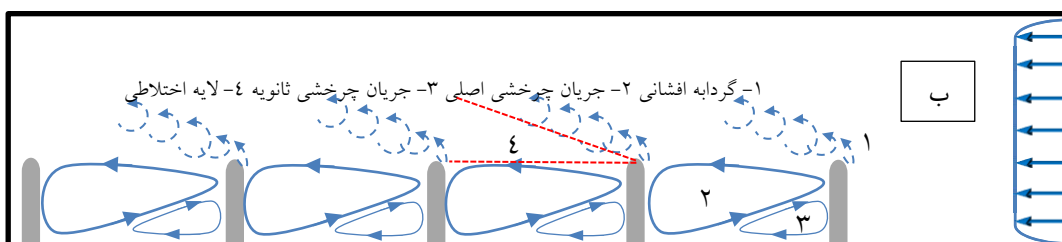
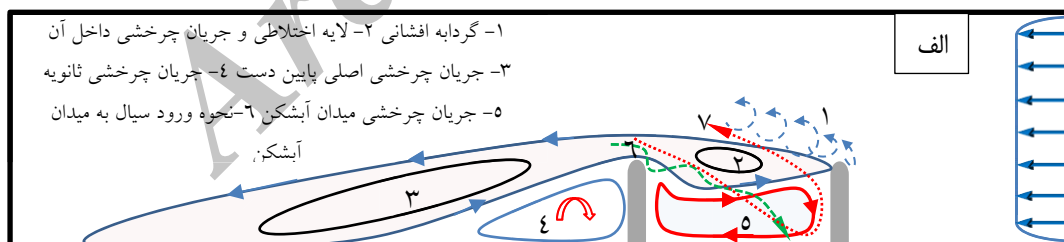
در مقابل، در حالت آبشکن دوتایی، رتیسیتی شدید جریان‌های چرخشی در داخل لایه اختلاطی انرژی کافی برای چرخش ساعتگرد کل سیال بین دو آبشکن را تامین می‌کنند و در نتیجه، شرایط شکل‌گیری ناحیه چرخشی دوم تامین نمی‌شود. برای هر دو نسبت طول، ضخامت لایه اختلاطی و همچنین میزان تاثیر آبشکن‌ها بر جریان داخل کانال در حالت دوتایی بسیار بیشتر از حالت گروه آبشکن است.

در شکل ۹ الگوی شماتیک جریان‌های متوسط و لحظه‌ای برای دو حالت مورد نظر ارائه شده است. با توجه به شکل ۹-الف به واسطه جریان‌های برگشتی پایین دست، تبادل جرمی قوی بین ناحیه بین دو آبشکن و جریان بیرون آن وجود داشته و بخش عمده این پروسه در نیمه بالادست میدان دو آبشکن رخ می‌دهد.

ساختار چرخشی لایه اختلاطی، منجر به دینامیک بودن شدید میدان آبشکن شده و در نتیجه می‌توان انتظار داشت، از جنبه زیست محیطی، اگر آلاینده‌ای به میدان دو آبشکن وارد شده باشد، زمان ماند آن بسیار کم تر از حالت گروه آبشکن خواهد بود، چرا که در حالت گروه آبشکن، تبادل جرم بین ناحیه مرده میدان آبشکن و جریان اصلی کانال به صورت برشی رخ داده و جریان لایه اختلاطی توان نفوذ به کل محدوده بین دو آبشکن و خروج سیال و آلاینده از آن را ندارد.

راستای چرخش پادساعتگرد به داخل لایه اختلاطی شده و این جریان‌ها باعث چرخش ساعتگرد سیال بین دو آبشکن می‌شوند. برای نسبت طول  $\lambda = 2$  علاوه بر راستای چرخش، ساختار نواحی چرخشی داخل میدان دو آبشکن متوالی نیز در دو حالت دوتایی و گروه آبشکن باهم متفاوت است.

در حالت آبشکن دوتایی، همان‌گونه که پیشتر نیز گفته شد، یک جریان چرخشی ساعتگرد شکل (۸-ج) به گونه‌ای شکل گرفته است که گسترش عرضی آن تا محدوده  $Y=0.8L$  است ولی در گروه آبشکن، دو ناحیه چرخشی مجزا شکل گرفته است (شکل ۸-د) به گونه‌ای که یک ناحیه چرخشی بزرگ ساعتگرد ایجاد شده و در کنار آن، ناحیه چرخشی ثانویه کوچکی در گوشه بالادست میدان آبشکن با جهت ساعتگرد تشکیل شده است. در این مورد نیز، علت تفاوت بین دو حالت، نقش لایه اختلاطی و تاثیر جریان برگشتی پایین دست و ورود آن به داخل میدان آبشکن دوتایی است. در گروه آبشکن، انرژی چرخشی میدان آبشکن فقط از طریق تبادل مومتم جریان اصلی کانال و سیال داخل میدان تامین می‌شود. جریان برگشتی ناحیه چرخشی اصلی، به واسطه کم عمق بودن جریان و نقش اصطکاک بستر در اتلاف انرژی آن، قادر به نفوذ به ناحیه پایین دست آبشکن اول نبوده و به همین علت تحت یک زاویه مشخص از دیواره کانال جدا شده و با اعمال تنش برشی به سیال گوشه میدان، باعث ایجاد ناحیه چرخشی ثانویه می‌شود.



شکل ۹ مقایسه ساختار جریان در میدان دو آبشکن با میدان سری آبشکن‌ها با نسبت طول  $\lambda = 2$  (الف) آبشکن دوتایی و (ب) سری آبشکن‌ها.

دوتایی، انرژی لازم برای شکل‌گیری نواحی چرخشی از طریق ورتیسیتهی گردابه‌های چرخشی ناشی از جریان برگشتی پایین دست در داخل لایه اختلاطی تامین می‌شود، در حالیکه در گروه آبشکن، این انرژی فقط از طریق تبادل مومتم بین جریان اصلی کانال و ناحیه مرده بین دو آبشکن متوالی به ناحیه چرخشی منتقل می‌شود. از دیدگاه کاربردی، با توجه به دینامیک بودن ناحیه بین آبشکن دوتایی، استفاده از آن برای اصلاح مسیر و یا حفاظت کنار رودخانه مناسب نبوده و با توجه به تاثیر گذاری آن در هدایت جریان پر سرعت به سمت مجرای اصلی کانال، گزینه مناسبی برای حفاظت از سازه‌هایی مانند کوله پل خواهد بود.

## ۶- منابع و مراجع

- [1] McCoy, A., Constantinescu, G., and Weber, L. "Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes." *Journal of Hydraulic Engineering*, (2008), 134(2), 157-172.
- [2] Uijtewaal, W., Lehmann, D., and Mazijk, A. "Exchange processes between a river and its groyne fields: model experiments" *Journal of Hydraulic Engineering*, (2001), 127(11): 928-936.
- [3] Uijtewaal, W. "Effects of groyne layout on the flow in groyne fields: laboratory experiments" *Journal of Hydraulic Engineering*, (2005), 131(9): 782-791.
- [4] Weitbrecht, V., Jirka, G.H. "Flow patterns in dead zones of rivers and their effect on exchange process", *International Symposium on Environmental Hydraulics*, (2001), Tempe, USA.
- [5] Sukhodolov, A., Uijtewaal, W.S.J. & Engelhardt, C. "On the correspondence between morphological and hydrodynamical patterns of groyne fields", *Earth Surface Processes and Landforms*, (2002), 7(3): 289-305.
- [6] Brevis, W. "Experimental investigation of the flow hydrodynamics in open channel dead zones" *PhD thesis*, (2009), Universidad de Chile.
- [7] Brevis W, Garcia-Villalba M & Nino Y. "Experimental and large eddy simulation study of the flow developed by a sequence of lateral obstacles" *Environmental Fluid Mechanics*, (2014), 14(4): 873-893.
- [8] Chen, F., & Ikeda, S. "Horizontal separation flows in shallow open channels with spur dikes", *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, (1989), 15:15-30.
- [9] Tominaga, A., Ijima, K. & Nakano, Y. "Flow structures around submerged spur dikes with various relative height", *In Proceeding of the 29th IAHR Congress*, (2001), Beijing, China.
- [10] Barbarutsi S., Ganoulis J., and Chu V.H.

از دیدگاه رسوب‌گذاری بین دو آبشکن و تثبیت جداره رودخانه، چون میزان دینامیک بودن ناحیه چرخشی گروه آبشکن، بسیار کمتر از حالت آبشکن دوتایی است، در نتیجه زمان ماند رسوبات معلق ورودی به میدان آبشکن‌های سری بسیار بیشتر از آبشکن دوتایی خواهد بود. پس، ته‌نشینی ذرات رسوب و تشکیل پشته‌های رسوبی در حالت سری، بهتر از حالت دو تایی رخ می‌دهد. با توجه به انحراف جریان و شکل‌گیری ناحیه چرخشی، کاربرد آبشکن دوتایی به صورت موضعی و حفاظت از سازه‌هایی مانند کوله پل می‌تواند مناسب باشد.

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، میدان سرعت بین دو آبشکن با استفاده از روش سرعت سنجی تصویری ذرات اندازه‌گیری شده و الگوی جریانهای متوسط و لحظه‌ای برای دو نسبت طول یک و دو ارائه شده است. همچنین نتایج حاصل از پژوهش با نتایج میدان سری آبشکن‌ها مقایسه و تشابه و تفاوت‌های دو حالت مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصله، وجود ناحیه چرخشی در پایین دست میدان دو آبشکن باعث انتقال جریان‌های چرخشی به داخل لایه اختلاطی و اندرکنش آنها با جریان بین دو آبشکن می‌شود به گونه‌ای که به واسطه این پدیده، تبادل جرم قوی بین میدان آبشکن و جریان بیرونی رخ داده و میدان آبشکن حالت دینامیک پیدا می‌کند. برای نسبت طول برابر با یک، یک ناحیه چرخشی توسعه یافته در کل میدان آبشکن شکل می‌گیرد که از محل بالادست آبشکن دوم به لایه اختلاطی متصل است. افزایش فاصله بین دو آبشکن باعث شکل‌گیری یک ناحیه چرخشی در لایه اختلاطی شده و به تبع آن، ناحیه چرخشی داخل آبشکن در راستای عرضی دچار فشردگی می‌شود. در هر دو حالت تنها یک ناحیه چرخشی ساعتگرد در میدان آبشکن شکل می‌گیرد. بر خلاف میدان دو آبشکن، در حالت گروه آبشکن، با افزایش فاصله بین آبشکن‌ها، تعداد ناحیه چرخشی افزایش یافته و علاوه بر آن جهت چرخش نواحی چرخشی نیز مخالف با حالت آبشکن دوتایی، به صورت پاد ساعتگرد است. در حالت آبشکن

39(6): 1096–1100.

[13] Rhoads, B. L., & Sukhodolov, A. N. "Spatial and temporal structure of a shear layer turbulence at a stream confluence", *Water Resources Research*, (2004), 40, W06304, doi: 10.1029/2003WR002811.

"Experimental investigation of shallow recirculating flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, (1989), 128(10): 891-900.

[11] Uijtewaal, W. S. J. and Booij, R. "Effects of shallowness on the development of free-surface mixing layers", *Physics of Fluids*, (2000), 12(2): 392-420.

[12] Westerweel, J., and Scarano, F. "Universal outlier detection for PIV data", *Experiments in Fluids*, (2005),

Archive of SID



# Experimental Study of Turbulent Flow Structures in Two Groynes Field using PIV Method

Z. Safarzadeh<sup>1\*</sup>, A. Safarzadeh<sup>2</sup>

1- M.Sc. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Ardabil Branch

2- Associate Prof., Civil Eng. Dept., Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

safarzadeh@iauardabil.ac.ir

## Abstract:

In this paper, the flow field between two straight groynes in shallow wide open channel has been measured using Particle Image Velocimetry method. Groynes with 25cm length, 5cm width and 7cm height with two aspect ratios ( $\lambda$ ) of 1 and 2 have been located in the fully developed zone of a 18m length flume and velocity measurements carried out in order to study the circulating flow, structure of the mixing layer and downstream separation zone. Surface Particle Image Velocimetry was conducted using two Procilica GE1910 CCD cameras with 37 Hz measuring frequency. Images resolution was 90\*1660 pixels. Image processing was performed using GPIV software and Westerweel, 2005 and Brevis, 2009 methods were used for filtering of the measured velocity fields. Matlab programs were developed for the post processing of the measured data. Results are presented in forms of time averaged values, turbulence intensities and the Reynolds stresses at the various zones of the groyne field. Results showed that due to the flow shallowness, most of the turbulent structures are two dimensional. Development of a back flow from downstream zone to the groyne field enhances the complexity of the mixing layer and mass exchange phenomenon compared to the groyne series configuration. In the  $\lambda=1$  case, a fully developed gyre forms inside of the groyne field. The circulation zone is connected to the mixing layer at the head of the upstream groyne. By increasing the distance between the groynes, i.e., for the  $\lambda=2$  case, another circulation zone forms inside of the mixing layer. Consequently the circulation zone inside of the groyne field is depressed in the transverse direction. In the both cases a single gyre forms inside of the groyne field. While, the previous works showed that in the groyne series case, by increasing the aspect ratio, number of the gyres between groynes increases. Furthermore, unlike to the two groynes case, gyres rotate in the clockwise direction.

In two groyne case, the rotational energy is fed from the vorticity of the back flow to the circulation zone in the groyne field, while in the groyne series case, the momentum transfer between the free flow and the dead zone in the groyne field is responsible for the formation of multiple gyres inside of the groyne field. Two groynes field has complex dynamic flow features and it is not a suitable choice for modification of the river alignment or the bank stabilizing projects. On the other hand, they move the high velocity zone to the channel center and they could be used as protection measures for the river structures like bridge abutments.

The mixing layer of two groynes case is fully dynamic and it can deeply penetrate into the groyne field. While, in the groyne series case, exchange processes between dead zones and main stream are governed by large coherent two-dimensional structures which are generated at the head of the upstream groyne. Consequently, in terms of the environmental issues, the retention time of the trapped pollutants in a two groynes field will be shorter than the groyne series case.

**Keywords:** Turbulent flow, mixing layer, SPIV, back flow, vorticity.