

مطالعه عددی جریان آشفته و فرآیندهای مؤثر بر آبشستگی حول آبشکن مستقیم با بستر صلب

مهسا ثبات^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{۲*}، اکبر صفرزاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۶

چکیده

در مطالعه حاضر به بررسی فیزیک جریان و نقش ساختارهای منسجم جریان در فرآیند آبشستگی در اطراف یک آبشکن قائم واقع در کانالی مستقیم و در شرایط شروع آبشستگی (بستر مسطح)، پرداخته شده است. به این منظور از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) برای جریانی با مقدار نسبتاً کم عدد رینولدز استفاده شده است ($Re=18000$). جریان ورودی کاملاً آشفته و حاوی نوسانات آشفته است. پس از تصویرسازی جریان، مشاهده شد که شدت ساختار گردابه گردنبندی نعل اسبی (HV) در مقاطع اطراف نوک آبشکن به حداکثر میزان خود می رسد. در این ناحیه هسته گردابه گردنبندی بین دو حالت مختلف نوسان می کند. در یکی از آن ها (مود جریان صفر)، گردابه گردنبندی به آبشکن نزدیک تر شده و جت جریان در زیر آن ضعیف می شود. در حالت دیگر (مود برگشت جریان)، جت نزدیک به بستر، گردابه گردنبندی را به دور از آبشکن منتقل می کند. بنابراین توزیع انرژی جنبشی آشفته و نوسانات فشار در این محل شکلی دو قله ای می گیرند. بیشترین مقادیر تنش برشی بستر در ناحیه شتاب گیری جریان در نزدیکی نوک آبشکن و در زیر قسمت بالادست لایه برشی منفصل (DSL) مشاهده می شوند. انتهای گردابه نعل اسبی گاهی با لوله های گردابی افشاندگی شده در DSL و با نوک آبشکن اندرکنش می کند. برخی از گردابه های افشاندگی شده در DSL نیز به صورت تصادفی با یکدیگر یا با گردابه های ناحیه بازچرخش در پشت آبشکن اندرکنش می کنند. این مسئله نیز منجر به ازدیاد تنش برشی بستر در طول مسیر آن ها می شود.

واژه های کلیدی: آبشکن مستقیم، آشفته گی، LES، گردابه نعل اسبی، لایه برشی

مقدمه

آبشکن، (DSL) و همچنین حضور پدیده های مختلف فیزیکی در جریان قبل و بعد از آبشکن می باشد.

وقتی که جریان به سمت آبشکن حرکت می کند، به علت گرادیان فشار معکوس، لایه مرزی ورودی جدا شده و ساختارهایی چرخشی، شبیه به گردنبند در اطراف پایه آبشکن شکل می گیرند (شکل ۱). این ساختارهای بزرگ مقیاس آشفته، دینامیک جریان و رسوب را در اطراف یک آبشکن کنترل می کنند. این گردابه ها تحت عنوان سیستم گردابه های نعل اسبی (HV^۵) شناخته شده اند.

وقتی که جریان ورودی به طور کامل آشفته باشد (این موضوع در برنامه های کاربردی مهندسی رودخانه بسیار مورد توجه قرار گرفته است)، سیستم HV در اطراف سطوح مانع (همچون ستون ها و اجسام بال شکل)، ناپایدار شده و از نظر موقعیت، اندازه و شدت، تحت تغییرات بزرگ زمانی قرار می گیرد. علاوه بر آن، درون سیستم HV، انرژی جنبشی آشفته (TKE)، میزان آشفته گی و جذر میانگین مربعات نوسانات فشار (RMS^۶) به مقدار قابل توجهی افزایش می یابد

برای ایجاد پایداری در سواحل رودخانه، از آبشکن های مختلف استفاده می شود. در رودخانه های بزرگ در سراسر جهان، این سازه ها احداث شده تا با محدود کردن سطح مقطع عرضی رودخانه، کانال را برای کشتیرانی متناسب کرده و زیستگاه گیاهان و جانوران را بهبود ببخشد.

جریان و آبشستگی در اطراف یک آبشکن قائم، شباهت بسیار به جریان در اطراف کوله پل دارد (Kwan and Melville, 1994). آبشکن با انسداد، باعث ایجاد یک میدان جریان سه بعدی (3D)، بسیار پیچیده و متلاطم در اطراف خود می شود که علت ایجاد آن جدایی لایه مرزی ورودی و جدایی لایه برشی تشکیل شده در نوک

۱- دانشجوی دکتری گروه سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد گروه سازه های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی
(* - نویسنده مسئول: Email: salehi@modares.ac.ir)

4- Detached Shear Layer
5- Horseshoe Vortex
6- Turbulent Kinetic Energy
7- Root-Mean-Square

همچنین تعامل آن‌ها با یکدیگر یا با سازه آبشکن دچار مشکل شوند. زیرا در این مطالعات، از تکنیک‌های تجربی برای به تصویر درآوردن ساختارهای منسجم جریان استفاده شده است (همانند مشاهده جریان با رنگ و اندازه‌گیری جریان در سطح آب). حتی تکنیک‌های مبتنی بر سنجش تصاویر ذرات (PIV) مثل 2D PIV برای دریافت اطلاعات مربوط به ساختارهای منسجم، محدود به داده‌های یک مقطع از جریان در یک زمان مشخص است. زمانی که این ساختارهای منسجم سه‌بعدی هستند یا وقتی که هدف، درک اندرکنش بین این ساختارهاست، اطلاعاتی که توسط PIV دوبعدی ارائه می‌شود، در بسیاری از موارد ناقص است. البته، استفاده از 3D PIV ابزاری ایده‌آل برای بررسی این نوع جریان‌ها در آزمایشگاه است. اما متأسفانه داده‌های PIV سه‌بعدی برای جریان در اطراف آبشکن هنوز گزارش نشده‌اند.

با استفاده از روش‌های عددی که توانایی شبیه‌سازی سه‌بعدی از میدان جریان (میانگین و لحظه‌ای) را دارند، می‌توان ساختارهای اصلی جریان، پویایی آن‌ها و ماهیت اندرکنش آن‌ها با سازه‌های دیگر یا با بستر و نقش این ساختارها در فرآیند آبشستگی را روشن کرد. شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی همچنین می‌تواند اطلاعاتی را درباره کمیت‌هایی به ما دهد که تخمین آن‌ها براساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی بسیار مشکل است. به عنوان مثال، برای جریان حول آبشکن، با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی مبتنی بر گردابه می‌توان توزیع نوسانات فشار و تنش برشی در بستر را به دست آورد، همچنین می‌توان سیستم HV را در یک لحظه مشاهده کرد و اندرکنش بین گردابه‌های گردنبندی و گردابه‌های DSL را ثبت نمود.

امروزه محبوب‌ترین روش عددی برای پیش‌بینی جریان، روش متوسط‌گیری رینولدز از معادلات آشفتگی ناویر استوکس (RANS^۲) است. در این روش، تأثیر ساختارهای جریان (گردابه‌ها و چرخابه‌ها) بر جریان میانگین از طریق مدل آشفتگی RANS به دست می‌آید. روش RANS ناپایدار^۴ (URANS) نیز توانسته ساختارهای بزرگ‌تر را حل کند. تجارب پیشین نشان می‌دهد که هر دو مدل RANS پایدار و ناپایدار تا حد زیادی در پیش‌بینی مؤلفه‌های مهم جریان لایه‌برشی که تحت کنترل گردابه‌ها و اندرکنش‌های آن‌ها قرار دارند، ضعیف عمل می‌کنند (McCoy et al., 2008). علاوه بر آن، اطلاع داشتن از جریان متوسط، برای فهمیدن نقش ساختارهای حاکم بر فرآیند آبشستگی، کافی نیست.

(Devenport and Simpson., 1990). در مورد جسمی که بر بستر صاف نصب شده باشد، این افزایش قابل توجه TKE و نوسانات فشار در واقع مربوط به گردابه گردنبندی اصلی است که بین دو حالت مشخص، نوسانات نامنظم دو مودی^۱ و بزرگ مقیاس با فرکانس نسبتاً پایین انجام می‌دهد. به این معنی که به دلیل نوسان گردابه گردنبندی اصلی بین این دو حالت، ناحیه‌ای دو مودی ایجاد شده و در نتیجه در شکل هیستوگرام‌های سرعت آن، نوسانی دو قله‌ای ظاهر می‌شود. شواهد قابل توجهی وجود دارد که تنش برشی بستر نیز در زیر ناحیه HV تقویت می‌شود. این موضوع نقش مهم این سیستم را در گسترش چاله آبشستگی در بسترهای رسوبی، به ویژه پس از مراحل شکل‌گیری اولیه آن توضیح می‌دهد.

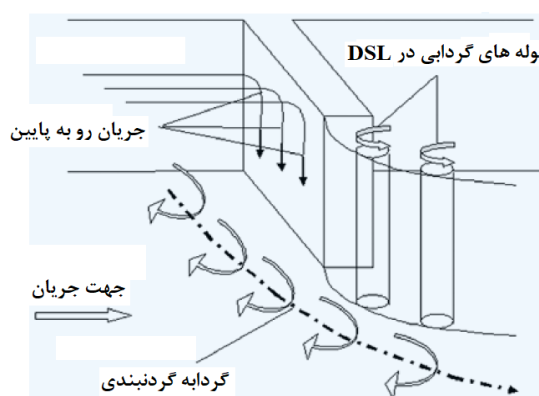
اما با این وجود، سیستم HV عامل اصلی ایجاد آبشستگی نیست. برای مثال به طرح ارائه شده در شکل ۱ دقت شود. جریان شدیدی در نزدیکی نوک آبشکن شتاب گرفته و جریانی موازی با وجه بالایی آبشکن، رو به پایین دست جاریست و گردابه‌هایی که درون DSL افشاند می‌شوند، همگی می‌توانند تنش برشی وارد بر بستر را افزایش دهند و موجب آبشستگی موضعی شوند. علاوه بر این، اندرکنش گردابه‌های درون DSL و گردابه‌های دنباله سازه نیز می‌تواند گردابه‌هایی قوی در نزدیکی بستر ایجاد کند که ممکن است رسوبات را انتقال داده و موجب برآمدگی یا فرو رفتگی در سطح آب شوند. اطلاعات اندکی در مورد دینامیک دقیق این اندرکنش‌ها و تأثیر آن‌ها بر تنش برشی بستر و در نهایت انتقال رسوبات، وجود دارد.

بنابراین ضروری است که درک درستی را از ساختار جریان در اطراف آبشکن‌ها و کوله‌های پل، در مراحل مختلف فرآیند آبشستگی داشت زیرا در نهایت منجر به توسعه مدل‌های جدیدی که فیزیک جریان و رسوب را بهتر می‌شناسند، می‌شود. علاوه بر این، شناخت بهتر فیزیک جریان، منجر به توسعه روش‌های موثرتر برای کنترل و جلوگیری از بروز آبشستگی زیاده از حد در اطراف این نوع سازه‌ها می‌شود.

یکی از موضوعات مهم در زمینه مطالعات مهندسی رودخانه، شناخت فیزیک جریان در ارتباط با فرآیند آبشستگی و پیش‌بینی روند و پیشبرد و حداکثر عمق آبشستگی در اطراف و کوله‌های پل و آبشکن‌هاست (Koken and Constantinescu., 2011; Jackson et al., 2012). همچنین با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی اطلاعات بسیاری در زمینه جریان‌های اطراف احجام واقع بر بستر، بدست آمده است (Wei et al., 2001)، اما پیچیدگی جریان، باعث می‌شود این روش‌ها برای توضیح کامل فیزیک جریان به ویژه در اثر فرآیند آبشستگی موضعی و به ویژه نقش جداگانه هر یک از ساختارهای منسجم غالب در ایجاد مراحل مختلف آبشستگی و

2- Particle Image Velocimetry
3- Reynolds averaged Navier-Stokes
4- Unsteady RANS

1- Aperiodic oscillations



شکل ۱- ساختارهای منسجم اصلی و پدیده‌های فیزیکی موجود در جریان در گذر از یک آبشکن

گزارش دادند که نشان دهنده وجود نوسانات دو مودی است (Koken and Constantinescu., 2008a, 2009, 2014;) در مطالعه پیک و همکاران (Krajnovic and Davidson., 2002). در مطالعه پیک و همکاران (Paik et al., 2007) نشان داده شد که دینامیک دو مودی گردابه‌های گردنبندی به دلیل تغییر بین دو حالتی است که گردابه‌های گردنبندی به شدت منسجم‌اند و حالتی که جریان با حضور گردابه‌های طره مویی در اطراف گردابه‌های گردنبندی اصلی، بهم ریخته تر می‌شود.

هدف از مطالعه حاضر، استفاده از روش LES برای بررسی دینامیک ساختارهای منسجم حاکم بر جریان، در گذر از یک آبشکن قائم، در کانالی مستقیم با دیواره‌های جانبی قائم، در ابتدای آغاز فرآیند آبشستگی (با بستری مسطح) است. برای صحت‌سنجی نتایج، از داده‌های آزمایشگاهی (Koken and Constantinescu, 2008a) برای سنجش نتایج استفاده شده است که با استفاده از روش $LSPIV^2$ به مشاهده جریان پرداخته بودند. از این داده‌ها برای بررسی برخی از نتایج LES مثلاً تجزیه و تحلیل میدان لحظه‌ای و میانگین جریان استفاده شده است. مطالعه حاضر در مقدار نسبتاً کم رینولدز ($Re = 18000$) انجام شده، اما جریان ورودی به طور کامل آشفتگی و حاوی نوسانات واقعی آشفتگی است. مطالعه حاضر محدود به آبشستگی در آب زلال است و اندرکنش ذرات رسوب با ساختارهای منسجم را در نظر نمی‌گیرد. مطالعات متعددی در فلومی با مقدار نسبتاً مشابه رینولدز (۲۵۰۰۰ تا ۵۵۰۰۰) انجام گرفته (Ettema et al., 2006) که نشان می‌دهد انجام چنین تحقیقاتی برای درک پدیده‌های آبشستگی موضعی و دینامیک جریان مربوط به آن در آب زلال الزامی است. در این مطالعه، ساختار ناپایدار سیستم HV و خصوصیات آشفتگی در ناحیه اطراف آبشکن مورد آنالیز قرار گرفته تا درک بهتری از مکانیسم‌های آبشستگی در فاز اولیه فرسایش و رسوب‌گذاری حاصل

اما روش‌های حل گردابه مثل روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES^1) یا روش‌های هیبرید RANS و LES مثل روش شبیه‌سازی گردابه‌های منفصل (DES^2) برای پیش بینی این نوع جریان‌ها بسیار موفق بوده‌اند. در LES همه ساختارهای مهم جریان به صورت دینامیک و مستقیم حل می‌شوند و فقط مقیاس‌های کوچکتر (subgrid) مدل می‌شوند. با این حال، برای حل ساختارهای پویایی که در اطراف یک جسم واقع بر بستر ایجاد می‌شوند، در یک مقدار مشخص از رینولدز، باید از شبکه‌ای که به اندازه کافی ریز و گام زمانی‌ای که به اندازه کافی کوچک باشد، استفاده کرد تا بتوان پویایی این گردابه‌ها را به درستی تصویر کرد. به‌ویژه هنگامی که در استفاده از توابع دیوار اجتناب می‌شود، LES نیازمند سیستم‌های محاسباتی بزرگی است که باید به طور قابل توجهی با افزایش مقدار رینولدز جریان بزرگتر شوند. حضور جدایی جریان و گرادیان فشار معکوس باعث می‌شود که استفاده از رویکرد تابع دیواره، برای پیش‌بینی جریان در اطراف آبشکن و دیگر اجسام واقع بر بستر زیر سوال برود. بنابراین، یکی از گزینه‌های مناسب این است که LES در یک مقدار نسبتاً کم از رینولدز انجام شود (مثلاً در محدوده‌ای که بیشتر مطالعات جریان در فلوم، در گذر از سازه‌های مشابه انجام شده)، اما جریان ورودی حاوی نوسانات واقعی آشفتگی باشد. این رویکردی است که در مطالعه حاضر اتخاذ شده است.

تحقیقاتی مرتبط با موضوع مطالعه حاضر هستند که به وسیله تکنیک‌های حل گردابه برای جریان‌های لایه برشی، به خصوص برای جریان در گذر از اجسام واقع بر بستر انجام گرفته‌اند. در بسیاری از این مطالعات سیستم HV و دینامیک آن توصیف نشده است (Choi and Yang., 2002; Paik and Sotiropoulos, 2005). تحقیقات دیگری اما وجود هیستوگرام دو قله‌ای سرعت را درون HV

1- Large Eddy Simulation
2- Detached Eddy Simulation

شده است.

آزمایشات تجربی (Koken and Constantinescu., 2008a) در یک فلوم به طول ۲۷/۴۴ متر، عرض ۰/۹۱ متر و عمق ۰/۴۵ متر انجام گرفته‌اند. یک صفحه مستطیلی با طول ۰/۱۵ متر و عرض ۰/۰۲ متر که همان آبشکن است، به صورت عمودی به یکی از دیوارهای جانبی و در جایی که جریان ورودی در آنجا به طور کامل توسعه یافته شده، متصل شده است. عمق جریان $D = 0.1$ و سرعت متوسط آن $U = 0.18 \text{ m/s}$ ($Re = 18000$) تنظیم شد و از روش LSPIV برای تعیین الگوهای خطوط جریان متوسط در سطح آب در نواحی مورد نظر استفاده شده است.

در شبیه سازی عددی، عمق جریان (D) به عنوان مقیاس طولی و سرعت متوسط در کانال اصلی (U)، به عنوان مقیاس سرعت استفاده می‌شود. طول و عرض دامنه به ترتیب $71/4D$ و $9D$ است. طول آبشکن $1/5D$ (مانند آزمایش) است. آبشکن در فاصله $31/41D$ از مقطع ورودی جریان قرار دارد. گام زمانی مورد استفاده در شبیه سازی $U / D = 0.002$ است. دامنه محاسباتی شامل حدود ۹ میلیون المان چهار گوشه است که با استفاده از تکنیک سنگ فرش^۷ (شکل ۲ ب) مرتب شده‌اند که امکان تولید مشی با کیفیت بالا را در اختیار ما قرار می‌دهد، به طوری که مش را در نزدیکی تمام دیوارها و در طول مسیر DSL ریزتر می‌کند. حداقل فاصله شبکه از جداره، 0.046 $y^+ = \Delta y^+ v / u_\tau$ (با فرض $u_\tau / U = 0.04$) بوده که در جهت عمود بر تمام سطوح صلب، استفاده می‌شود.

در مقطع ورودی، جریان آشفته کاملاً توسعه یافته در کانال ساده اعمال می‌شود. به این ترتیب که در مقطعی به فاصله $10D$ از ورودی داده‌های سرعت و فشار در هر گام زمانی برداشت شده و به ورودی کانال تزریق می‌شود. این فاصله به طوری انتخاب شده که در آنجا هم آشفتنگی و هم لایه مرزی ورودی کاملاً توسعه یافته شده باشد و گردابه‌های قبل از آبشکن نیز بر داده‌های آن تأثیر نگذارد. در خروجی کانال، شرایط مرزی همرفتی بکار گرفته شد که اجازه می‌دهد ساختارهای منسجم بدون تولید نوسانات غیرفیزیکی خارج شوند. سطح آزاد به صورت پوش صلب^۸ در نظر گرفته می‌شود. در آزمایشگاه نیز تغییرات سطح آزاد ناچیز بوده، لذا این فرض توجیه پذیر است. در این شرایط، مقدار عدد فرود برای جریان ($Fr_D = 0.18$) بسیار کوچکتر از یک است. جداره‌ها به صورت مرزهای بدون لغزش^۹ لحاظ می‌شوند (مؤلفه‌های سرعت بر روی گره‌های جداره برابر با صفر در نظر گرفته شده و سرعت گره‌های مجاور آن‌ها با میانبازی از سرعت گره‌های بالاتر و سرعت صفر جداره به دست می‌آید).

شود. به‌ویژه، توزیع نوسانات فشار و TKE و حضور و نقش نوسانات دو مودی گردابه گردنبندی در این توزیع‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در نهایت، مطالعه حاضر تلاش می‌کند که درک بهتری از اندرکنش بین ساختارهای آشفته اصلی جریان با یکدیگر و بستر، و چگونگی تأثیر آن‌ها را در توزیع تنش برشی بستر پیدا کند.

مواد و روش‌ها

حلگر عددی، مدل LES و تنظیمات شبیه سازی

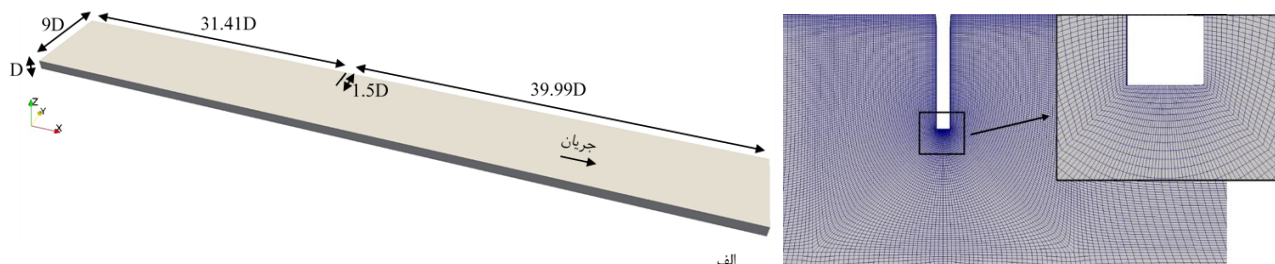
کد مورد استفاده در مطالعه حاضر، یک کد نوشته شده به روش LES موازی (MPI^۱) در نرم افزار openFoam است که برای حل معادلات فیلتر شده Navier-Stokes، از روش حجم محدود در مدل دینامیک Smagorinsky استفاده می‌کند (McCoy et al., 2007). در فرمولبندی روش پیشگو - مصحح^۲، مؤلفه‌های سرعت دکارتی، در مرکز سلول تعیین شده و سرعت‌های عمود بر سطوح سلول، در مرکز سلول تعریف شده و اساساً به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته می‌شوند. در هر دو بعد زمان و مکان، الگوریتم گام جزئی^۳ با دقت مرتبه دوم به کار رفته است. همه اپراتورهای کد، مثل ترم‌های همرفتی معادلات، با استفاده از تقریب خطی گاوس^۴ گسسته می‌شوند. برنامه عددی به کار رفته برای حل معادلات ناویر-استوکس، به صورت مستقل انرژی را حفظ کرده که باعث افزایش کارایی الگوریتم عددی بدون اعمال ضرایب اتلاف می‌شود که برای افزایش دقت LES الزامی است. برای گسسته سازی زمانی ترم‌های همرفتی و لزجت در معادله مومنتوم (در مرحله پیشبینی)، از روش عقبگرد^۵ استفاده شده است. در تکرار زیرگام‌های زمانی نیز، سیستم حاصل از گسسته سازی ضمنی زمان، با استفاده از روش بازخورد پیوسته^۶ (SOR) حل شده است. از هیچ تابع دیواره‌ای استفاده نمی‌شود و معادلات حاکم از طریق زیرلایه لزج به یکدیگر متصل می‌شوند.

کد به کار رفته، توانایی استفاده از مش‌های ترکیبی غیر ساختاری را داراست که اجازه می‌دهد پیش بینی جریان به درستی در هندسه‌های بسیار پیچیده و سلول‌های انبوه، در مناطقی که دینامیک جریان نیاز به یک مش بندی خوب دارد، با حفظ کیفیت بالای مش در دامنه انجام گیرد. همچنین استفاده از شبکه‌های غیر ساختاری می‌تواند به میزان قابل توجهی زمان صرف شده برای تولید شبکه در هندسه‌های پیچیده را کاهش دهد.

در شکل ۲، مش بندی در سطح آزاد جریان، در اطراف آبشکن و همچنین دامنه جریان مورد استفاده در شبیه سازی حاضر، نشان داده

- 1- Message Passing Interface
- 2- predictor-corrector
- 3- fractional step algorithm
- 4- Gauss linear
- 5- backward schemes
- 6- successive overrelaxation

- 7- Paving method
- 8- Rigid-lid
- 9- No-slip



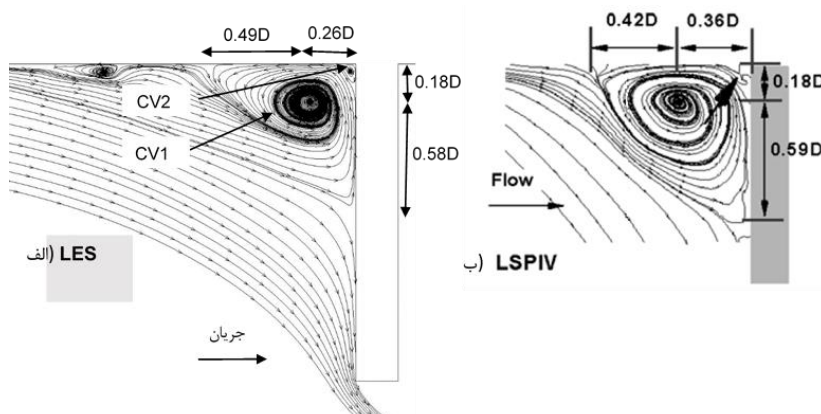
شکل ۲- دامنه محاسباتی و مش بدون ساختار در صفحه‌ای افقی در ناحیه اطراف آبشکن

نتایج

مقایسه الگوی جریان LES و LSPIV در سطح آزاد

در مطالعه آزمایشگاهی از داده‌های LSPIV برای تعیین خطوط جریان میانگین در سطح آزاد آب ($z/D = 1$) در اطراف آبشکن مستقیم استفاده شد (Koken and Constantinescu, 2008a). الگوی کلی خطوط دو بعدی جریان برای سرعت متوسط، در ناحیه بازچرخش جریان در بالادست آبشکن، در شکل‌های الف و ب و ۳ نشان داده شده‌اند. LES و LSPIV هر دو شکل گیری یک گردابه گوشه‌ای اصلی (CV1) و یک گردابه گوشه‌ای کوچک (CV2) را در

جریان متوسط پیش بینی کردند. در LES، مرکز CV1 به فاصله $(x, y) = (0.18D, 0.26D)$ از محل تقاطع آبشکن و دیوار جانبی قرار دارد و در آزمایش در محل $(x, y) = (0.18D, 0.26D)$ قرار گرفته است. در شبیه سازی LES، طول ناحیه جدایی جریان $0.75D$ و در آزمایش $0.77D$ است. در LES، عرض ناحیه بازچرخش $0.76D$ و در آزمایش $0.77D$ است. میزان چرخش گردابه گوشه‌ای اصلی CV1 (یعنی انتگرال گردش قائم آن بر مساحت) با استفاده از میداین سرعت متوسط جریان در سطح آزاد، محاسبه شده که مقدار LES و LSPIV برای آن به ترتیب $0.87DU$ و $0.81DU$ است.



شکل ۳- مقایسه خطوط جریان متوسط در سطح آزاد آب، در منطقه بالادست آبشکن: (الف) خطوط دو بعدی جریان حول آبشکن مستقیم در LES (ب) خطوط دو بعدی جریان حول آبشکن مستقیم در LSPIV (ج) خطوط دو بعدی جریان حول آبشکن T شکل در LES

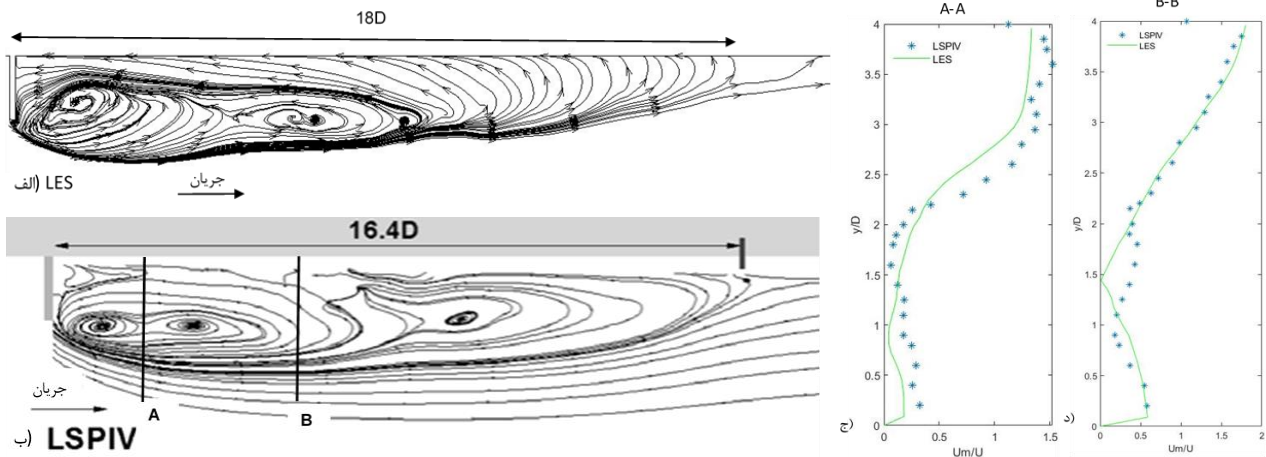
سیستم گردابه نعل اسبی

بخشی از سیستم HV را ساختارهای منسجم موجود در ناحیه بازچرخش جریان در بالادست آبشکن تشکیل می‌دهند که برای آبشکن T در شکل ۵ با استفاده از معیار Q به نمایش درآمده‌اند (Dubief and Delcayre., 2000). مقدار Q دومین ناوردا^۱ از تانسور گرادیان سرعت (در نتایج LES) است

شکل ۴ الف و ۴ ب الگوی کلی خطوط دو بعدی جریان را در ناحیه بازچرخش در پایین دست آبشکن مستقیم مقایسه می‌کنند. شبیه سازی LES طول کل منطقه بازچرخش را $1.8D$ و LSPIV طول این منطقه را $1.6/4D$ پیش‌بینی می‌کند. نتایج هر دو LES و LSPIV نشان می‌دهد که سه گردابه چرخان در ناحیه بازچرخش در پایین دست جریان دارد. بردارهای سرعت در دو مقطع (مقاطع A و B در شکل ۴ ب) در شکل‌های ۴ ج و ۴ د با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

امکان ایجاد این سطوح را به شکل یک پکیج گردابه‌ای میسر می‌سازد.

($Q = -0.5 \partial u_i / \partial x_j \partial u_j / \partial x_i$) که نشان دهنده تعادل بین نرخ چرخش و نرخ فشار است. سطوح هم تراز Q مثبت، مناطقی را نشان می‌دهد که در آن‌ها قدرت چرخش بر فشار فائق آمده و در نتیجه



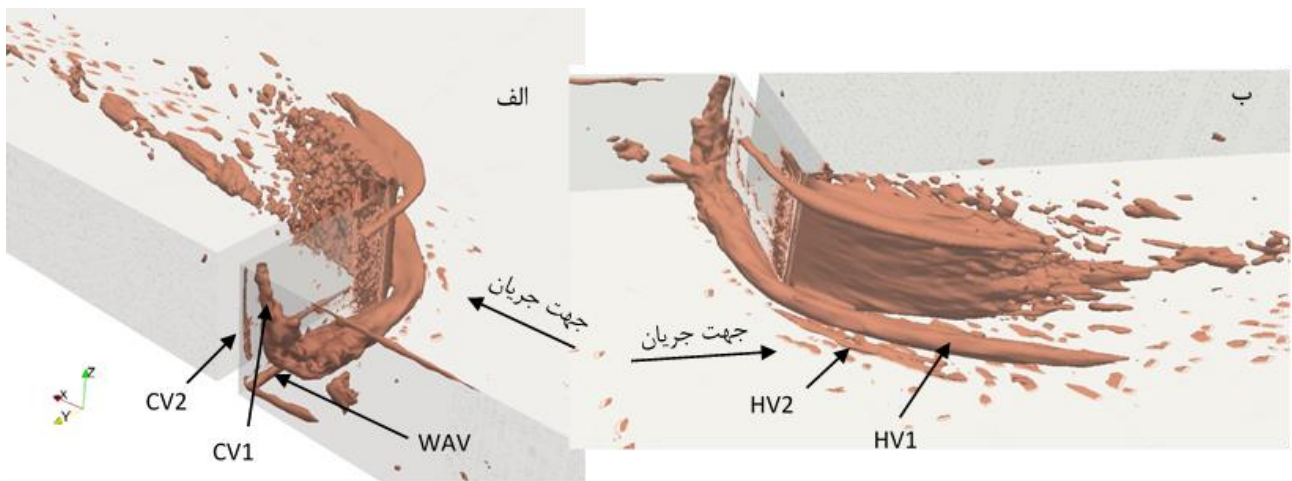
شکل ۴- مقایسه خطوط دو بعدی جریان متوسط در پایین دست آبشکن مستقیم: (الف) LES؛ (ب) LSPIV؛ (ج) بردارهای سرعت در مقطع A-A؛ و (د) بردارهای سرعت در مقطع B-B

می‌رسد که بخش پایین دستی نسبتاً پایدار بوده و حتی شدت آن افزایش می‌یابد. در شکل عج، به دلیل اندرکنش شدید بخش سمت راست HV1 با نوک آبشکن، قسمت بالایی هسته آن از قسمت پایین دست جدا شده و سپس بخش پایین دست در ادامه حرکتش با دیوار جانبی زاویه‌ای حدود ۴۵ می‌گیرد. شدت و انسجام بخش بالادست همچنان کاسته شده به طوری که در همین شکل، قسمتی از آن عملاً دیگر قابل مشاهده نیست. در صورتی که بخش پایین دستی، شروع به افزایش انسجام و گردش خود می‌کند. هسته گردابه در جهت رو به دیوار جانبی آبشکن شروع به گسترش خود می‌کند. در حالی که این فرایند ادامه می‌یابد (شکل عد و ۶)، گردابه گردنبندی اصلی در اطراف نوک آبشکن پیچیده شده تا شکلی شبیه به آنچه که در شکل ۶الف مشاهده شد را به خود بگیرد که در آن انسجام HV1 در اوج خود بود. از آنجایی که اندرکنش این گردابه با آبشکن در یک فرکانس مشخص اتفاق نمی‌افتد، زمان تناوب تغییر انسجام گرداب گردنبندی اصلی از مقدار کم تا بسیار زیاد، در حدود $3-5 D/U$ تخمین زده می‌شود.

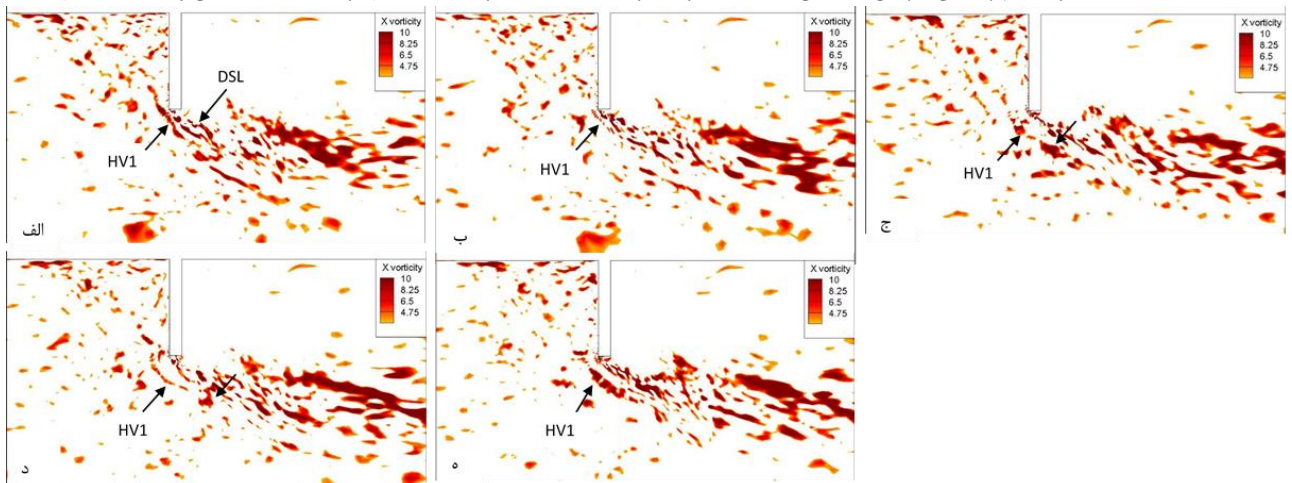
پدیده دیگری که برای حمل و نقل رسوب اهمیت دارد، جدا شدن تکه گردابه‌هایی از قسمت پایین دست و انتهای گردابه‌های گردنبندی (به ویژه HV1) است. وقتی که این تکه‌های جدا شده با جریان جابجا می‌شوند، می‌توانند بدون اندرکنش با آشفته‌گی نزدیک بستر، رسوب را از ناحیه پایین دست آبشکن به خود جذب کرده و در ادامه مستهلک شوند.

در کنار گردابه گردنبندی اصلی (HV1)، یک ساختار گردنبندی دوم (HV2) نیز در نزدیکی بالادست نوک آبشکن وجود دارد. این ساختارها در نزدیکی بستر قرار دارند و به تدریج جهت خود را از جهت موازی با آبشکن به عمود بر آن تغییر داده و تا نزدیکی نوک آبشکن، به موازات DSL ادامه پیدا می‌کنند. یک گردابه گوشه‌ای کوچک (WAV) در محل اتصال وجه بالادست آبشکن و بستر کانال وجود دارد. دو ساختار چرخشی دیگر نیز در منطقه بازچرخش جریان در بالادست آبشکن در محل اتصال بین باله آبشکن و دیوار جانبی آن وجود دارد که با حروف CV1 و CV2 نشان داده شده‌اند. گردابه اصلی گوشه‌ای CV1 نیز با حرکتی شبیه به گردباد، از سطح آزاد شروع شده و هسته آن در ابتدای شروع، عمودی است. همانطور که این گردابه به بستر نزدیک می‌شود، ابتدا شروع به خم شدن در جهت طولی کرده و در نهایت با HV1 ادغام می‌شود که با این حرکت، ممان بیشتری به جریان درون هسته گردابه HV1 تزریق می‌کند.

شکل ۶ توزیع مقادیر چرخش عرضی ω_y را در چند لحظه مختلف، در صفحه‌ای به موازات بستر در فاصله $\Delta z/D = 0.18$ نشان می‌دهد. این صفحه تقریباً از محل هسته HV1 گذرانده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با یک فلش به مسیر گذر HV1 اشاره شده است. در شکل ۶الف، HV1 بسیار منسجم به نظر می‌رسد و مقدار چرخش درون هسته آن نسبتاً زیاد است. در شکل ۶ب، بخش سمت سازه HV1 به آبشکن نزدیک‌تر شده و شروع به اندرکنش با قسمت بالادست DSL و با نوک آبشکن می‌کند. در ضمن، به نظر



شکل ۵- مشاهده ساختارهای چرخشی جریان میانگین با استفاده از معیار Q: (الف) ساختارهای منسجم در بالادست آبشکن و (ب) سیستم HV



شکل ۶- کانتورهای چرخش عرضی در فاصله $\Delta Z/D = 0.18$ از بستر برای زمان‌های (الف) $t = 0D/U$ ، (ب) $t = 0.4D/U$ ، (ج) $t = 0.8D/U$ ، (د) $t = 1.2D/U$ و (ه) $t = 1.6D/U$ (مناطق که در آن مقدار چرخش کم بوده سفید شده‌اند)

گردنبندی اصلی HV1 را نشان می‌دهد اما به دلیل سه بعدی بودن شدید جریان، رسم خطوط دوبعدی جریان روشی دقیق برای تعریف موقعیت و اندازه این گردابه نیست و دانستن مقادیر اسکالر مانند TKE و نوسانات فشار RMS برای تعریف آن بسیار مناسبتر است چراکه ناحیه HV دارای شدت آشفتگی بسیار بالاست. مشابه با تحقیقات دیگری که برای سیستم HV در جریان در تقاطع انجام گرفته (Dargahi., 1990; Devenport and Simpson., 1990)، نتایج شبیه سازی حاضر نیز به وضوح نشان می‌دهد که آشفتگی درون سیستم HV بر آشفتگی پس زمینه غلبه دارد. به خصوص، در مناطقی مثل محل گردابه گردنبندی اولیه HV1 که بیشترین نوسانات زمانی را دارد، آشفتگی بسیار بالاست. همچنین در مقطع e، باید به تعاملات بین قسمت پایین دست HV1 و DSL، قبل از پخش شدن هسته گردابه HV1 باید توجه نمود.

آن‌ها همچنین می‌توانند با گردابه‌های افشاندۀ شده در DSL، در یک مسیر بسیار غیر خطی اندرکنش انجام داده و منجر به شکل گیری چرخابه‌ای بسیار قوی شوند که می‌تواند رسوب را به صورت موضعی به خود جذب کند. رد طولی این گردابه در شکل ۶د نشان داده شده است. گردابه‌هایی که به درون DSL کشیده می‌شوند می‌توانند مقدار تنش برشی موضعی را نیز بالا برده و با گذر از آبشکن، به شروع فرآیند آبشستگی و توسعه چاله آبشستگی کمک کنند.

نوسانات دو مودی گردابه گردنبندی اولیه در سیستم HV

برای توصیف بیشتر ساختار سه بعدی و شدت سیستم HV درامداد هسته خود، به صورت عددی، توزیع انرژی جنبشی آشفتۀ (TKE) و نوسانات میانگین ریشه (RMS) فشار همراه با خطوط دو بعدی سرعت متوسط جریان، در مقطعی عمودی در شکل ۷ رسم و نشان داده شده است. اگرچه خطوط دو بعدی جریان، حضور گردابه

بیشتری از وجود دو مود مختلف ارائه شده که به وسیله تجزیه و تحلیل هیستوگرام تابع چگالی احتمال^۱ مؤلفه عرضی سرعت، در مکان‌هایی واقع در هسته گردابه گردنبندی اولیه به دست آمده‌اند (شکل ۹). هیستوگرام‌ها در مقاطع a تا e، توزیعی دو قله‌ای را درون ناحیه هسته HV1 برای نوسان بین دو مود مذکور نشان می‌دهند. همانطور که توسط دیونپورت و سیمسون نیز نشان داده شد، توزیع دو قله‌ای نشانه واضحی از وجود نوسانات دو مودی است (Devenport and Simpson., 1990). تغییرات سرعت بین این دو مود در مقطعی که نزدیک به جداره و نوک آبشکن می‌گذرد به حد اکثر خود می‌رسد. همانطور که قبلاً ذکر شد، در مقطعی که از محل نوک آبشکن می‌گذرد، شدت سیستم HV بیشینه است. به همین ترتیب در مقطعی که در پایین دست آبشکن واقع شده‌اند (مثل مقطع f)، هیستوگرام‌ها سرعت، شکل معمولی یک قله‌ای خود را بازیابی می‌کنند. به این معنی که نوسانات دو مودی، دور از سازه و نزدیک به انتهای گردابه گردنبندی اصلی وجود ندارند.

لایه برشی منفصل شده و دنباله سازه

شکل ۱۰ افشانه شدن لوله‌های گردابی^۲ را در فرکانس نسبتاً بالا از سمت نوک آبشکن نشان می‌دهد. میانگین عدد اشتروال^۳ که در آن لوله‌های گردابی افشانه می‌شوند، در اطراف آبشکن مستقیم حدود ۴ است که بسیار نزدیک به نمونه مشابه آن در جریان حول استوانه (Kirkil و همکاران، ۲۰۰۶) و همچنین منطبق با فرکانس‌های غالب ناشی از پدیده ناپایداری کلین-هلمولتز است که در قسمت بالادست لایه برشی جدا شده از اجسام حجیم واقع بر بستر و با عدد رینولدز مشابه ایجاد می‌شود (Kim and Durbin., 1998). مشاهده می‌شود که قسمت پایین دست گردابه گردنبندی اصلی و گردابه‌های گردنبندی ثانویه که به سمت گردابه اصلی رانده می‌شوند، می‌توانند با گردابه‌های درون DSL اندرکنش کنند. این اندرکنش‌ها از علل اصلی تغییرات شدید در ساختار و میزان انسجام سیستم HV هستند (شکل ۶).

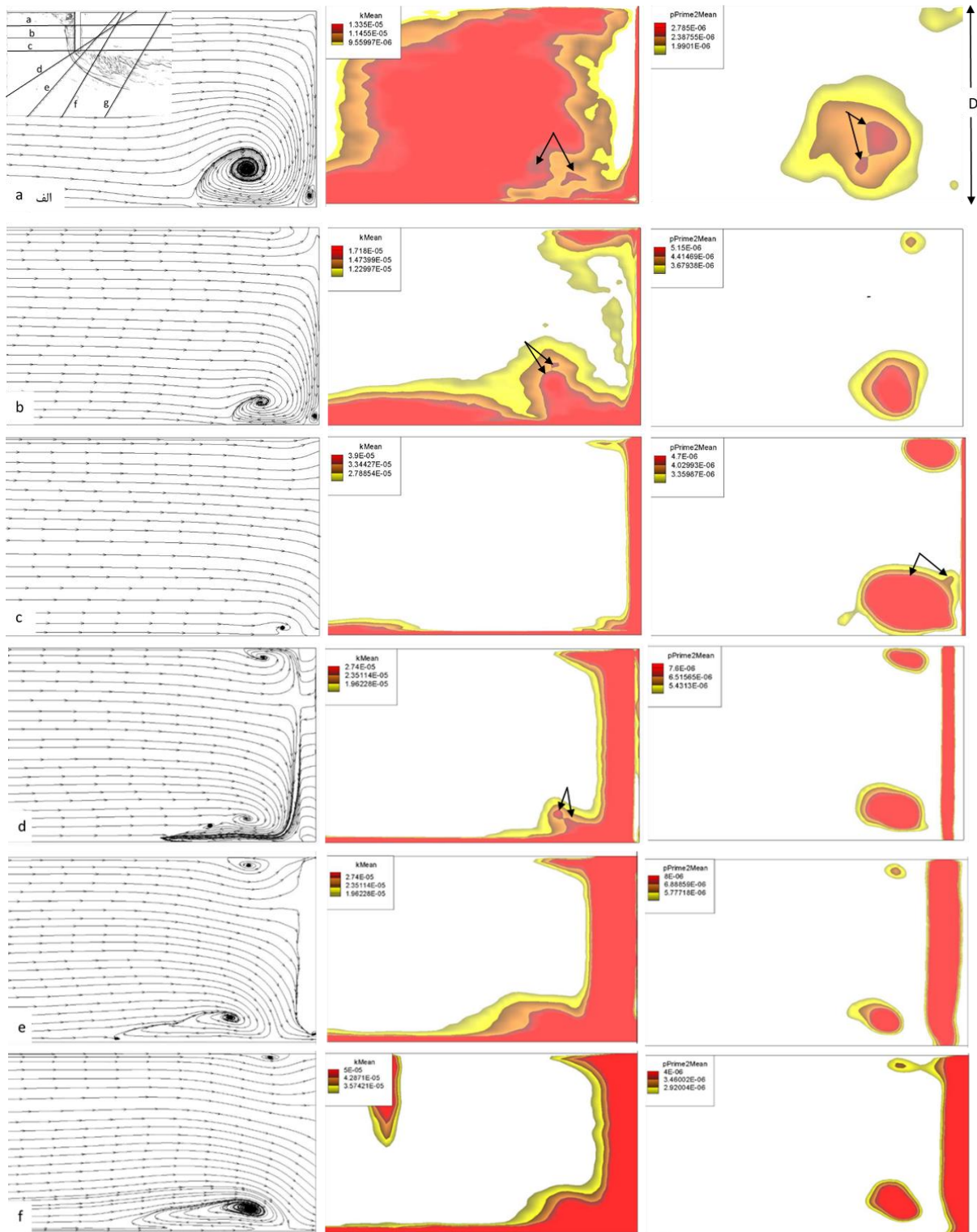
شکل ۱۱، به صورت کمی اثر تراکم لوله‌های گردابی را در نزدیکی بستر نشان می‌دهد. هنگامی که این ساختارهای یکپارچه تغییر مسیر داده و با یکدیگر درگیر می‌شوند (بعضاً، تلفیق دو لوله به صورت متوالی)، می‌توانند مقادیر بالایی از تنش برشی موضعی را ایجاد کنند. این مقادیر قابل مقایسه با مقادیر مشاهده شده در زیر گردابه گردنبندی هستند. قاب‌های شکل ۱۱، نشان دهنده پروسه ازدیاد قسمتی از تنش برشی در بستر است که در اثر عبور از این گردابه‌ها ایجاد می‌شوند (به جهت فلش‌ها دقت شود).

نوسانات میانگین ریشه (RMS) فشار و کانتورهای TKE پدیده جالب دیگری را نیز نشان می‌دهند. دو قله در توزیع این مقادیر درون مناطق HV در تقریباً تمام مقاطع واقع در بالادست و اطراف آبشکن وجود دارد (مقاطع aV تا d). در نهایت، توزیع این دو مقدار با یک قله در انتهای HV1 ایجاد می‌شود (مقطع eV و f) دلیل ایجاد این نوع توزیع، عمدتاً به دلیل ماهیت دو مودی جریان درون سیستم آشفته HV است. این نوسانات غیر پرودیگ و نامنظم گردابه گردنبندی که با فرکانس‌های پایین در اطراف اجسام حجیم واقع بر بستر ایجاد می‌شوند، برای اولین بار توسط دیونپورت و سیمسون (Devenport and Simpson., 1990) گزارش شد که در مطالعه خود جریان را در گذر از یک جسم بال شکل در مقدار رینولدز حدود ۱۰۵ بررسی کردند. بنابراین، همانطور که در مقدمه بحث شد، این نوسانات غیر پرودیگ به عنوان یک مشخصه کلی از سیستم آشفته HV شناخته می‌شوند.

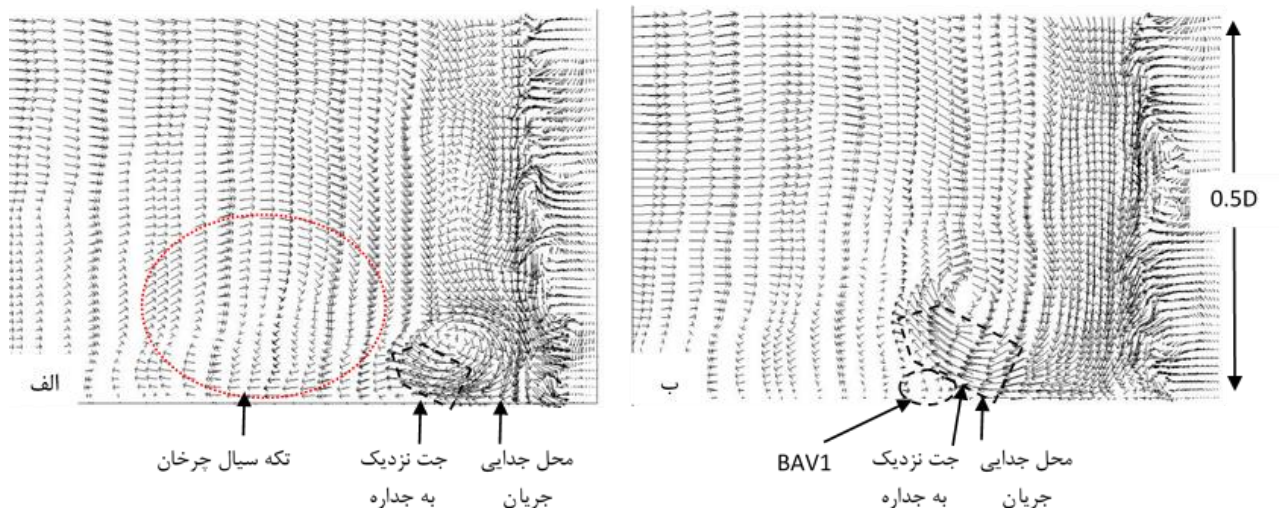
هنگامی که یک جریان غیر چرخشی (مثلاً از سمت سطح آزاد) با مومنتوم زیاد به وجه بالادست آبشکن می‌رسد، به سمت پایین و بستر تغییر جهت داده و در آنجا سعی می‌کند با حفظ خاصیت غیر چرخشی خود، یک جت قوی در نزدیک جداره و در جهت خلاف جریان اصلی شکل دهد. این جت دیواری، محور HV1 را به دور از آبشکن حرکت داده و شکل بزرگتری به هسته آن داده و منجر به بازگشت جریان می‌شود. این سناریو در شکل ۸ ب با استفاده از بردارهای سرعت در مقطعی عمودی نشان داده شده است (مقطع d در شکل ۷ که از نوک آبشکن شروع شده و زاویه ۶۰ درجه با آن می‌سازد). این سناریو مطابق است با آنچه که توسط دیونپورت و سیمسون، برای صفحه تقارن جریان در گذر از یک جسم بال شکل حجیم واقع بر بستر مشاهده شد (چنین سطح مقطعی برای آبشکن حاضر تعریف نشده است) (Devenport and Simpson., 1990). وضعیت فوق العاده دیگر این است که یک تکه سیال بسیار چرخان که از لایه مرزی ورودی جدا شده و دارای اندازه حرکت نسبتاً کم است به آبشکن برسد. در این حالت انتظار می‌رود جدایی جریان زودتر رخ داده و هسته گردابه گردنبندی کوچکتر و نزدیک‌تر به آبشکن واقع شود. این رویداد به عنوان مود صفر جریان شناخته می‌شود که توسط بردارهای سرعت در شکل ۸ الف نشان داده شده است. در هر دو مورد، منطقه بازچرخش ضعیفی در ناحیه بالادست جدایی جت جریان مشاهده می‌شود (BAV1). توپولوژی جریان در شکل ۸ مربوط به این دو مود جریان، بسیار شبیه جریان‌بست که دیونپورت و سیمسون مشاهده شده است (Devenport and Simpson., 1990). نوسانات HV1 بین این دو مود، دلیل وجود ساختار دو قله‌ای در کانتورهای TKE و نوسانات فشار را توضیح می‌دهد و همچنین علت افزایش بیش‌ازحد شدت آشفته‌گی در داخل منطقه HV نیز هست (بیش از ۱ مرتبه، مشابه با مطالعات تقاطع رودها)

در شبیه سازی فعلی جریان در اطراف یک آبشکن، شواهد

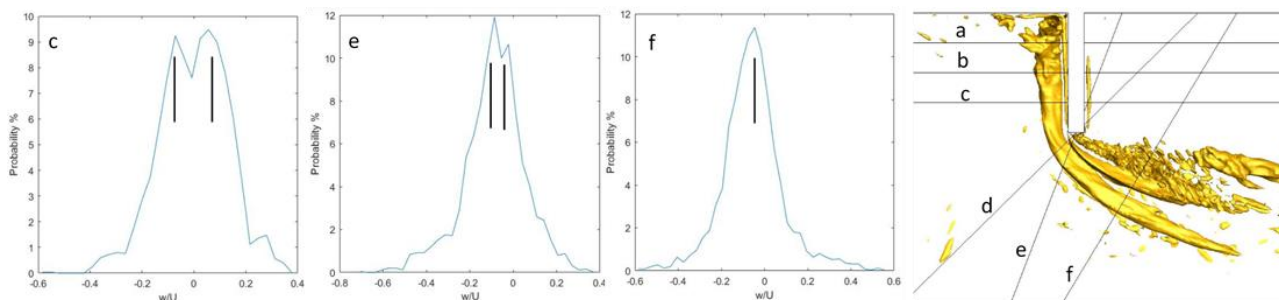
1- Probability density function
2- Vortex tubes
3- Strouhal number



شکل ۷- خطوط جریان، TKE و نوسانات میانگین ریشه فشار در چند مقطع عمودی. در شکل ۷ الف موقعیت این مقاطع نشان داده شده است.



شکل ۸- بردارهای سرعت لحظه‌ای در یک مقطع که از محل نوک آبشکن می‌گذرد (مقطع d در شکل ۷) که مربوط به الف) مود صفر و ب) مود برگشت جریان در سیستم HV می‌باشند.



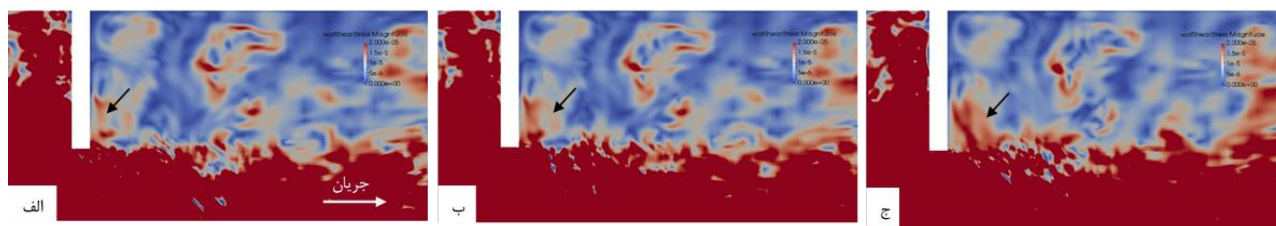
شکل ۹- هیستوگرام سرعت عرضی در نقاطی واقع در درون هسته گردابه گردنبندی اصلی HV1 (موقعیت مقاطع در کادر آخر نشان داده شده).

گردابه‌هایی که از نوک آبشکن افشاند می‌شوند در منطقه‌ای درست در پشت آبشکن مستقر می‌شوند. ورود این گردابه‌ها به سمت ناحیه بازچرخش جریان منجر به افزایش موضعی تنش برشی بستر در طول مسیرشان می‌شود.

همانطور که این گردابه‌ها به سمت پایین دست حرکت می‌کنند، اندازه آن‌ها بزرگتر شده اما از شدت آن‌ها کاسته می‌شود (با اندازه گیری مقدار چرخش)، به طوری با فاصله گرفتن از منطقه افشاندن شدن، مقدار تنش برشی بستر در کل کاهش می‌یابد. گاهی، برخی از



شکل ۱۰- مشاهده ساختارهای چرخشی جریان لحظه‌ای در اطراف آبشکن با استفاده از معیار Q در نمای بالا



شکل ۱۱- خطوط تنش برشی لحظه‌ای بستر به صورت بی بعد در زمان‌های الف) $t = 0.8D/U$ ، ب) $t = 1.2D/U$ ، ج) $t = 2D/U$

توزیع تنش برشی بستر

یک مزیت مهم LES آن است که در آن معادلات در زیرلایه لزوج نیز حل شده و بنابراین می‌توان بدون هیچگونه ساده سازی (مثل قانون جداره)، تخمین مستقیمی از توزیع تنش برشی بستر (یا معادل آن، سرعت اصطکاکی u_τ) در میدان جریان متوسط و لحظه‌ای داشته باشیم. همچنین در یک بستر فرسایش پذیر می‌توان مناطقی که در آن‌ها مقدار تنش برشی بستر بیش از تنش برشی بحرانی می‌شود را توسط نمودار شیلدز مشخص کرد. در تحقیق کوکن و کنستانتینسکو (Koken and Constantinescu, 2008a) در یک بستر رسوبی با اندازه رسوب ($d_{50} = 0.68 \text{ mm}$) و با صرف نظر از اثرات گرانث (بستر مسطح)، مقدار بحرانی برای حمل رسوب، $(u_{\tau_{co}}/U = 0.106)$ به دست آمد.

توزیع سرعت اصطکاکی متوسط و لحظه‌ای u_τ ، به ترتیب در شکل‌های ۱۳ الف و ب نشان داده شده است. به علت شتاب گرفتن زیاد جریان در اطراف نوک آبشکن، بزرگترین مقادیر سرعت اصطکاکی در آنجا رخ می‌دهد. این موضوع با مشاهدات تجربی نیز سازگار است که نشان می‌دهند فرسایش در این منطقه آغاز می‌شود، جایی که سرعت در جهت مماس با DSL بوده و در مقایسه با سرعت کلی جریان در کانال، به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد (Rajaratnam and Nwachukwu., 1993; Molinas et al., 1998). مشاهده می‌شود که مقادیر بزرگ u_τ در جریان میانگین و لحظه‌ای، در زیر گردابه گردنبندی HV1 و در ناحیه بالای DSL ایجاد می‌شوند. این موضوع در شکل ۱۳ ج نیز مشخص شده که در آن گردابه گردنبندی HV1 و DSL با استفاده از معیار Q مورد مطالعه قرار گرفته و توزیع این کمیت بر روی توزیع سرعت اصطکاکی متوسط قرار داده شده است. در شکل حاضر، افزایش مقدار سرعت اصطکاکی در زیر HV1 به علت حضور همزمان گردابه گردنبندی و جریان شتاب گرفته بوده و مشارکت هر دو عامل قابل توجه است.

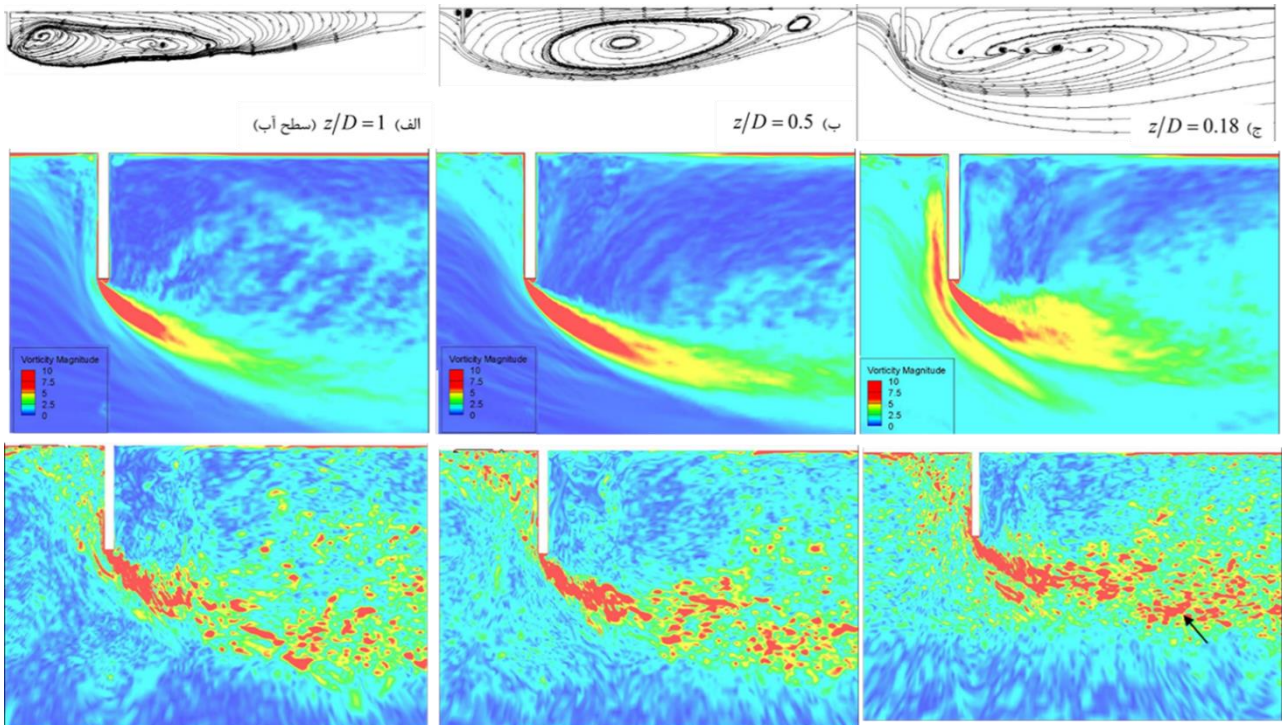
اگرچه مقادیر میانگین u_τ ، در بخش پایین دست DSL به سرعت کاهش می‌یابد اما مقادیر موضعی و لحظه‌ای بزرگی از تنش برشی بستر در فواصل طولانی از پایین دست از آبشکن مشاهده می‌شوند (در بسیاری از نقاط مقادیر $u_{\tau_{co}}/U$ از مقدار آستانه آن یعنی ۰.۱۰۶، فراتر رفته است). این مقادیر بزرگ از سرعت اصطکاکی بستر بوسیله

شکل ۱۲ تغییر الگوی خطوط جریان دو بعدی و مقدار چرخش را نسبت به عمق جریان، در DSL و در ناحیه بازچرخش، در پایین دست آبشکن و همچنین توزیع لحظه‌ای اندازه چرخش را در یک لحظه خاص نشان داده می‌دهد تا درک بهتری از تفاوت‌های میدان جریان لحظه‌ای و میانگین حاصل شود. با نزدیک شدن به سطح آزاد، نرخ استهلاك چرخش درون DSL بیشتر می‌شود. همچنین نزدیک به سطح آب عرض DSL در نزدیکی آبشکن در مقایسه با عمق وسط آب بیشتر می‌باشد. همچنین نزدیک به بستر ($z/D = 0.18$)، می‌توان به طور واضح اندرکنش بین گردابه گردنبندی اصلی HV1 و DSL را مشاهده کرد. شکل آن‌ها بسیار شبیه بهم هستند.

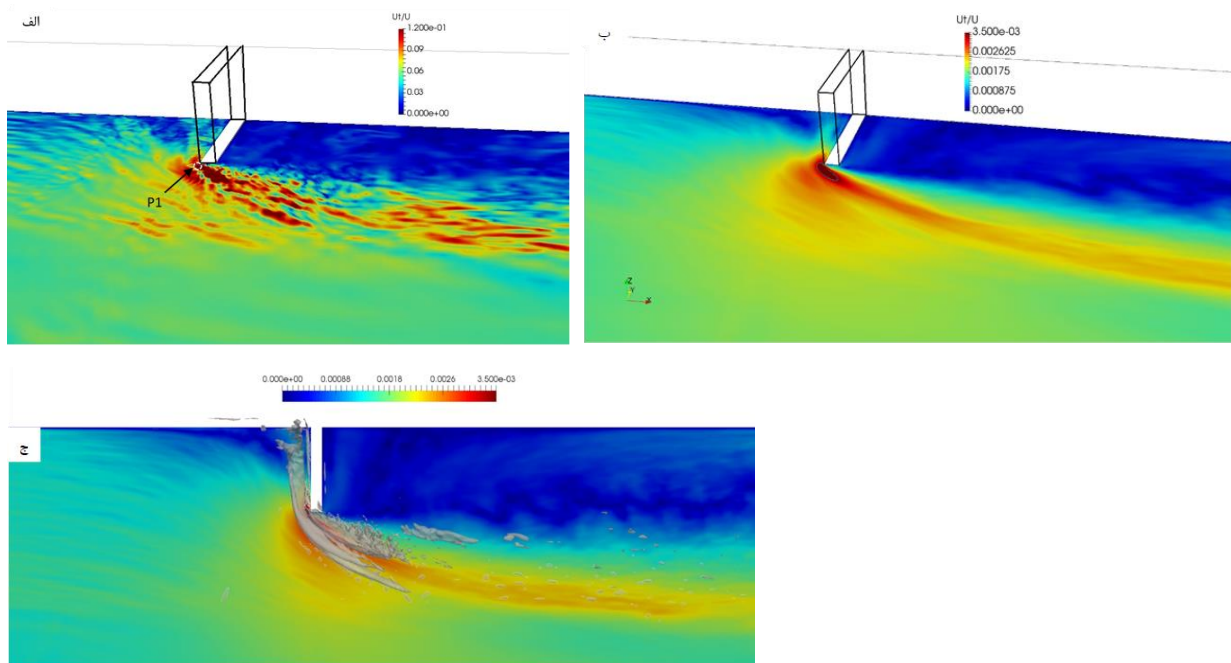
توزیع مقدار چرخش در راستای عمق، در جریان لحظه‌ای با آنچه که در جریان میانگین ایجاد می‌شود، کاملاً تفاوت دارد. دلیل اصلی این تفاوت، وجود طیف وسیعی از ساختارهای پر انرژی جریان در بین DSL و دیواری که در آن آبشکن احداث شده، می‌باشد. جریان لحظه‌ای نشان می‌دهد که لوله‌های گردابی با گردابه‌های نزدیک به ناحیه دنباله سازه به صورت نامنظم و غیر خطی اندرکنش می‌دهند. همانطور که به بستر نزدیک می‌شویم ($z/D = 0.18$) تمایز بین لوله‌های گردابی با گردابه‌های DSL و گردابه‌های گردنبندی سیستم HV سخت تر می‌شود. این ساختارهای یکپارچه، در ناحیه ی نزدیک به بستر با یکدیگر اندرکنش کرده و در هم پیچیده و یکدیگر را مختل می‌کنند. همین اندرکنش هست که توزیع لحظه‌ای تنش برشی بستر در ناحیه اطراف نوک آبشکن تعیین می‌کند.

همانطور که قبلاً در شکل ۶ نشان داده شد، گاهی رگه‌هایی بزرگ از گردابه، دور از نوک آبشکن مشاهده می‌شوند. شکل ۱۲ ج یک نمونه دیگر از چنین رویدادی را نشان می‌دهد که در آن قسمت نیرومندی از گردابه‌های DSL به سمت بستر منحرف شده است. این پدیده (فلش را ببینید) در فاصله‌ای بیش از دو برابر طول آبشکن رخ می‌دهد. تنها براساس توزیع تنش برشی و چرخش در جریان میانگین، و حتی بر اساس مقادیر ناچیز این دو کمیت می‌توان این ناحیه را مشخص کرد، اما این کار برای میدان جریان لحظه‌ای ممکن نیست. لازم به ذکر است که این پدیده کاملاً در مسئله حمل رسوبات و تکامل شکل بستر در نواحی پایین دست آبشکن تاثیر دارد.

برخی از گردابه‌های چرخشی ایجاد می‌شوند که در نزدیکی بستر درون DSL را اشغال کرده‌اند و همچنین تکه گردابه‌هایی افقی و قوی که از پای گردابه‌های گردنبندی جدا شده و به سمت جریان پایین دست منحرف می‌شوند (توضیحات شکل ۱۱).



شکل ۱۲- ردیف بالا) خطوط دو بعدی جریان، ردیف وسط) کانتورهای چرخش متوسط و ردیف پایین) کانتورهای چرخش در جریان لحظه‌ای در سه صفحه برش افقی: الف) $z/D = 1$ ب) $z/D = 0.5$ و ج) $z/D = 0.18$



شکل ۱۳- سرعت اصطکاکی بستر: الف) جریان لحظه‌ای، ب) میانگین جریان، ج) جریان میانگین و موقعیت نسبی ساختارهای منسجم اصلی

خلاصه و نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از روش LES جریانی با رینولدز نسبتاً کم ($Re = 18000$) در عبور از آبشکنی عمودی در یک کانال مستقیم، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. جریان ورودی کاملاً آشفته بود. بستر کانال نیز مسطح و شرایطی مطابق با آغاز فرآیند آبشستگی داشت.

تحولات مکانی و زمانی سیستم آشفته HV در محل پی آبشکن مورد بررسی قرار گرفت. مشخص شد که انسجام، ساختار، موقعیت و شکل گردابه‌های گردنبندی اصلی در طول زمان بسیار متغیر است. در واقع، یک گردابه گردنبندی اصلی مشاهده شده که در تمام زمان‌ها حضور داشت، هر چند شدت و انسجام آن در زمان‌های مختلف می‌توانست بسیار متفاوت باشد. سیستم HV موجب افزایش موضعی TKE و نوسانات فشار نیز شد.

مشخص شد که مشابه با مطالعات قبل (Devenport and Simpson., 1990) گردابه گردنبندی اصلی به طور نامنظمی بین دو حالت نوسان می‌کند، که در یکی از آن‌ها گردابه به آبشکن نزدیک‌تر شده (جریان با مود صفر) و در دیگری یک جت قوی در نزدیکی بستر، گردابه گردنبندی را از آبشکن دور می‌کند (مود جریان بازگشتی). همچنین با تجزیه و تحلیل توزیع TKE و نوسانات فشار RMS در منطقه HV حضور این ساختار دو مودی درون HV تایید شد. این توزیع‌ها در مقاطعی در بالادست محور گردابه گردنبندی اصلی، دارای دو قله بودند (بالادست گردابه، یعنی نزدیک به دیواره مجانب آبشکن در بالادست). در قسمت پایین دست از گردابه گردنبندی اصلی (یعنی نقاطی که بعد از آبشکن قرار داشتند)، توزیع دو قله‌ای به تدریج ناپدید می‌شد. هیستوگرام سرعت محاسبه شده در هسته گردابه گردنبندی اصلی نیز شکلی دو قله‌ای را نشان می‌داد که نشانگر حضور نوسانات دومودی است. شدت نوسانات دومودی در مقطعی که در نزدیکی نوک آبشکن می‌گذشتند، به اوج می‌رسید. در این مکان‌ها میزان افزایش آشفتگی در ناحیه سیستم HV نیز به بالاترین حد خود می‌رسید. به عبارت دیگر این پدیده مسئول افزایش تلاطم در ناحیه HV به میزان چند برابر بیشتر از جدایی لایه مرزی آشفته ورودی است. همچنین مشاهده شد که قسمت‌های انتهایی گردابه نعل اسبی گاهی می‌توانند با گردابه‌های افشانه شده در درون لایه برشی و یا با نوک آبشکن اندرکنش داشته باشند. این رویداد به طور کلی منجر به از بین رفتن انسجام گردابه گردنبندی به مقدار زیاد، در مدت زمان‌های محدود می‌شود. توزیع تنش برشی در بستر، بیشترین مقادیر تنش را در ناحیه شتاب جریان در نزدیکی نوک آبشکن نشان داد. علاوه بر آن مقادیر بالایی از تنش برشی در زیر گردابه گردنبندی اولیه و زیر بخش بالادست DSL مشاهده شد.

همچنین مشخص شد که نوسانات تنش برشی موضعی بستر حول مقادیر میانگین آن می‌تواند بسیار زیاد باشد، به خصوص در ناحیه زیر DSL که لوله‌های گردابی افشانه می‌شوند که در بعضی مواقع با سایر گردابه‌ها نیز تعامل دارند. همچنین LES امکان تخمین شروع فرسایش را بر اساس توزیع آنی و میانگین سرعت اصطکاکی بستر و تخمین شدت نوسانات فشاری در بستر فراهم کرد.

منابع

- Choi, S. U. and W. Yang. 2002. Numerical simulation of 3-D flows around bridge piers, paper presented at First International Conference on Scour of Foundations, Tex. A&M Univ., College Station, Tex.
- Dargahi, B. 1990. Controlling mechanism of local scouring, *J. Hydraul. Eng.*, 116. 10. 1197 – 1214, doi: 10.1061/. ASCE0733-9429. 1990 116:10. 1197.
- Devenport, W. J. and R. L. Simpson. 1990. Time-dependent and time-averaged turbulence structure near the nose of a wing-body junction, *J. Fluid Mech.*, 210, 23–55, doi: 10.1017/S0022112090001215.
- Dubief, Y. and F. Delcayre. 2000. on coherent vortex identification in turbulence, *J. Turbul.*, 1, paper 11, doi:10.1088/1468-5248/1/1/011.
- Ettema, R., G. Kirkil, and M. Muste. 2006. Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders, *J. Hydraul. Eng.*, 132. 1. 33–40, doi: 10.1061/. ASCE0733-9429. 2006132:1. 33.
- Jackson, T. T., Haggerty, R., Apte, S., Coleman, A. and Drost, K. 2012. Defining and measuring the mean residence time of lateral surface transient storage zones in small streams.” *Water Resour. Res.*, 48, W10501.
- Kim, H. J. and P. Durbin. 1988. Observations of the frequencies in a sphere wake and of drag increase by acoustic excitation, *Phys. Fluids A*, 31, 3260–3265, doi:10.1063/1.866937.
- Kirkil, G., S. G. Constantinescu, and R. Ettema. 2006. Investigation of the velocity and pressure fluctuations distributions inside the turbulent horseshoe vortex system around a circular bridge pier, paper presented at River Flow 2006: International Conference on Fluvial Hydraulics, Int. Assoc. of Hydraul. Eng. and Res., Lisbon.
- Koken, M. and Constantinescu, G. 2008a. An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel. Part I. Conditions corresponding to the initiation of the erosion and deposition process.” *Water Resour. Res.*, 44. 8. W08406.

- McCoy, A., S. G. Constantinescu, and L. Weber. 2008. Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes, *J. Hydraul. Eng.*, 134. 2. 157 – 172, doi:10.1061/. ASCE07339429. 2008134:2. 157.
- Molinas, A., K. Kheireldin, and B. Wu. 1998. Shear stress around vertical wall abutments, *J. Hydraul. Eng.*, 124. 8. 822 – 830, doi:10.1061/. ASCE0733-9429. 1998124:8. 822.
- Paik, J. and F. Sotiropoulos. 2005. Coherent structure dynamics upstream of a long rectangular block at the side of a large aspect ratio channel, *Phys. Fluids*, 17. 11. 115104, doi:10.1063/1.2130743.
- Paik, J., C. Escauriaza, and F. Sotiropoulos. 2007. On the bimodal dynamics of the turbulent horseshoe vortex system in a wing body junction, *Phys. Fluids*, 19. 4. 045107.
- Rajaratnam, N. and B. Nwachukwu. 1983. Flow near groin-like structures, *J. Hydraul. Eng.*, 109. 3. 463–479.
- Wei, Q. D., G. Chen, and X. D. Du. 2001. An experimental study on the structure of juncture flows, *J. Visualization*, 3. 4. 341–348.
- Koken, M. and Constantinescu, G. 2009. An investigation of the dynamics of coherent structures in a turbulent channel flow with a vertical sidewall obstruction.” *Phys. Fluids*, 21. 8. 085104.
- Koken, M. and Constantinescu, G. 2011. Flow and turbulence structure around a spur dike in a channel with a large scour hole.” *Water Resour. Res.*, 47. 12. W12511.
- Koken, M. and Constantinescu, G. 2014. Flow and turbulence structure around abutments with sloped sidewalls. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140. 7. 04014031.
- Krajnovic, S. and L. Davidson . 2002. Large eddy simulation of the flow about a bluff body, *AIAA J.*, 40, 927–936.
- Kwan, R. T. and B. W. Melville. 1994. Local scour and flow measurements at bridge abutments, *J. Hydraul. Res.*, 32(5), 661–673.
- McCoy, A., S. G. Constantinescu, and L. Weber. 2007. A numerical investigation of the dynamics of coherent structures and mass exchange processes in a channel flow with two lateral submerged groynes, *Water Resour. Res.*, 43, W05445, doi:10.1029/2006WR005267.

Numerical Investigation on Turbulent Flow and Scour Leading Processes around Straight Dike in a Flat Bed Channel

M. Sobat¹, S. A. A. Salehi Neyshabouri^{2*}, A. Safarzadeh³

Received: Oct.17, 2019

Accepted: Nov.27, 2019

Abstract

The present study investigates the physics of the flow and the role of coherent structures of flow in the scouring process, around a vertical dike, located in a straight channel, at the beginning of scouring process (flat bed). Therefore large eddy simulation (LES) method is applied for a flow with a relatively low Reynolds number ($Re=18000$). The inflow is thoroughly turbulent and full of realistic turbulent fluctuations. After visualizing the flow, it was found that the intensity of the primary horseshoe vortex (HV) is largest at vertical sections around the tip of the dike. In this region, the core of the horseshoe vortex fluctuated between two modes. In one of them (zero-flow mode) the horseshoe vortex gets closer to the dike and the beneath flow jet gets weaker. In the other one (back-flow mode), the jet flow near the bed, takes the horseshoe vortex farther apart from the dike. As a result, in the distribution of turbulent kinetic energy and pressure fluctuations, two peaks are observed. The largest amounts of bed shear stress are present in the acceleration zone of flow near the tip of the dike, upstream of detached shear layer (DSL). The tail of the horseshoe vortex occasionally interacts with the vortex tubes shed in DSL and the tip of the dike. Furthermore some of the vortices shed in DSL may sometimes interact with each other or with the vortices present in the recirculation region behind the dike. This leads to amplification of bed shear stress along their path.

Keywords: Straight Dike, Turbulence, LES, Horseshoe vortex, Shear layer

1- Ph.D. Student of Hydraulic Structures, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

2- Professor of Hydraulic Structures, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

3- Associate Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

(*- Corresponding Author Email: salehi@modares.ac.ir)