

مطالعه آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان و شدت تلاطم در نواحی مرده کناری در یک کانال متقارن

حسین بانژاد^۱، حامد نوزری^{۲*}، فرزانه قائمی زاده^۳، بلیس انسوم^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۰

چکیده

نواحی مرده کناری جزء مناطق ذخیره اصلی در محیط زیست رودخانه هستند که تبادل جریان در کانال اصلی می‌تواند نوع جریان در این نواحی را به شدت تحت تاثیر خود قرار دهد. در پژوهش حاضر مطالعه آزمایشگاهی و عددی برای شبیه سازی جریان در یک کانال متقارن، شامل ده ناحیه مرده منظم در دو طرف کانال انجام گرفت. سرعت جریان سطحی در نواحی مرده دارای ابعاد مختلف با استفاده از روش پردازش تصویر اندازه‌گیری شد. برای مدل سازی عددی جریان نیز از مدل عددی STARCCM+ تحت مدل تلاطمی LES استفاده گردید. در نهایت الگوی جریان و نمودار شدت تلاطم برای داده‌های آزمایشگاهی و محاسباتی مدل عددی ترسیم گردید. نتایج نشان داد که بیشینه شدت تلاطم در مرز ناحیه مرده و کانال اصلی ایجاد می‌شود و همچنین مقدار آن با کاهش نسبت ابعاد حفره افزایش می‌یابد. بیشینه شدت تلاطم در نواحی با ابعاد بزرگتر (نسبت ابعاد کمتر از یک) سه برابر بیشینه شدت تلاطم در نواحی با ابعاد کوچکتر (نسبت ابعاد بزرگتر از یک) بود. همچنین نوع گردابه‌های ایجاد شده در نواحی با ابعاد بزرگتر، به شدت تحت تاثیر شکل کانال قرار گرفت و گردابه اولیه مشاهده نشد. اما در نواحی با ابعاد کوچکتر، گردابه اولیه و ثانویه تشکیل گردید.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، شدت تلاطم، مدل تلاطمی، ناحیه مرده

مقدمه

عمود بر جریان است. تعداد، اندازه، شکل و نوع گردابه‌های ایجاد شده تابع نسبت ابعاد حفره (W/L)، عدد رینولدز جریان در بالادست کانال و شکل حفره است (Weitbrecht et al., 2008. Jackson et al., 2012. Megneo et al., 2017). در حفره‌های مستطیلی با ابعاد بزرگتر (نسبت ابعاد کمتر از یک) معمولاً یک گردابه اولیه ایجاد می‌شود که بسته به شرایط جریان می‌تواند باز یا بسته باشد. اما در نواحی مستطیلی با ابعاد کوچکتر (نسبت ابعاد بیشتر از یک) معمولاً گردابه‌های ثانویه هم دیده می‌شود (Jackson et al., 2012. Megneo et al., 2017).

از آنجایی که مشخصات آشفتگی و به ویژه ساختارهای لحظه‌ای و مکانی آنها در درون حفره، هنوز به طور کامل شناخته شده نیست (Jackson et al., 2012. Megneo et al., 2017)، مطالعه مشخصات آشفتگی در داخل حفره بسیار حائز اهمیت است و به مدل سازی عددی نیاز دارد. از مدل‌های آشفتگی موجود می‌توان مدل‌های RANS^۱، DNS^۲ و LES^۳ (روش گردابه‌های بزرگ) را نام برد (Gualtieri et al., 2010). رسی و ایکارنو (۲۰۰۹) از مدل

کناره‌های رودخانه‌ها^۴ صاف و مستقیم نیستند و انحناهایی در مسیر خود دارند که نواحی مرده جانبی^۵ نامیده می‌شوند. وجود نواحی مرده در رودخانه‌ها نشان می‌دهد که تلاطم جریان در سرتاسر رودخانه همگن نیست (Chanson, 2004). جریان در داخل ناحیه مرده به صورت چرخشی است و گردابه‌های ایجاد شده به صورت گردابه‌های اولیه و گردابه‌های ثانویه نام برده می‌شوند (Weitbrecht et al., 2008). شکل ۱ طرح شماتیک از یک ناحیه مرده منظم را نشان می‌دهد. L طول ناحیه در جهت جریان و W عرض ناحیه در جهت

- ۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران
- ۲- دانشیار گروه مهندسی و علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
- ۳- دانشجوی دکتری گروه مهندسی و علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
- ۴- پروفیسور، گروه مکانیک، دانشکده مکانیک (IRD)، دانشگاه UBO، برست، فرانسه

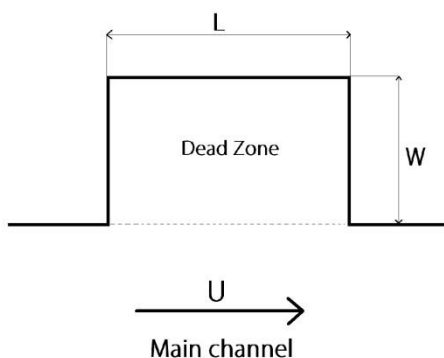
(Email: h.nozari@basu.ac.ir

*) - نویسنده مسئول:

- 8- Reynolds Averaged Navier-Stokes
- 9- Direct Numerical Simulation
- 10- Large Eddy Simulation

- 5- River Banks
- 6- Lateral dead zones
- 7- Stream wise length

متر بود. نسبت ابعاد حفره‌ها (W/L) متفاوت و در محدوده ۰/۴۷ تا ۳ بود. سایر مشخصات حفره‌ها در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱ - طرح شماتیک ناحیه مرده در حالت پلان

برای اندازه گیری دبی جریان از دستگاه فلومتر آلتراسونیک (مدل TFM3100-F1, Aktek) با رنج تکرار پذیری ۰/۲٪ و دقت ۱٪± استفاده گردید. اندازه گیری سطح آزاد آب با استفاده از یک دستگاه سطح سنج دستی با خطای $\pm 0.2\text{mm}$ انجام گرفت. در هر آزمایش برای رسیدن به شرایط جریان ماندگار عمق جریان در کانال اصلی، در مرز بین کانال اصلی و ناحیه مرده و در داخل ناحیه مرده برابر در نظر گرفته شد ($H_m=H_b=H_d$) (Weitbrecht et al., 2008). سرعت برشی با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$u_* = \sqrt{gh_M S_0} \quad (1)$$

در این رابطه آن g شتاب ثقل و S_0 شیب کف کانال است. در مطالعه حاضر شیب کف کانال برابر $S_0=0.0005$ است. جریان متلاطم ($Re > 2000$)، چگالی جریان آزاد هوا $1/277$ کیلوگرم بر متر مکعب، سرعت برشی $0/1328$ متر بر ثانیه و عدد فرود در خلال آزمایش کمتر از $0/4$ (در حدود $0/075$) بوده است. به دلیل کم بودن عدد فرود می‌توان اثر نیروی ثقل را نادیده گرفت. دبی برابر $7/8$ لیتر بر ثانیه و ارتفاع آب در کانال برابر 12 سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

اندازه گیری سرعت

با توجه به شرایط آزمایش، سرعت دو بعدی جریان در سطح جریان با استفاده از روش پردازش تصویر بزرگ مقیاس (LSPIV) اندازه گیری شد.

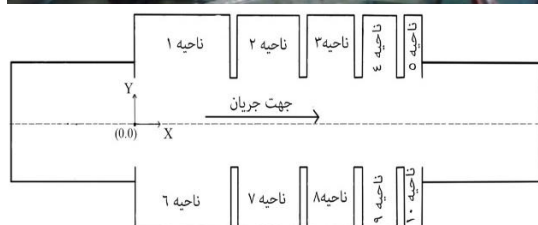
RANS برای شبیه‌سازی الگوی جریان در اطراف یک مانع مربع شکل در وسط جریان استفاده کردند؛ نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با توجه به اینکه شرایط حاکم بر جریان به صورت تک-ناحیه‌ای است، مدل RANS کارایی مناسبی در شبیه‌سازی جریان دارد (Rossi & Iaccarino, 2009). ون بالان و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که در جریان متلاطم، مدل LES در مقایسه با مدل RANS، سرعت متوسط را با دقت بیشتری شبیه‌سازی می‌کند (Van Balen et al., 2009). در پژوهشی دیگر، کنستانتینسکو و همکاران (Constantinescu et al., 2009) با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ (LES) به حل سه‌بعدی جریان آشفته پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از روش LES با استفاده از ضریب اسماکورینسکی، هزینه محاسباتی بیشتری دارد، اما به دلیل دقت بالاتر و استفاده از شبکه‌بندی بزرگ‌تر، هزینه محاسبات اضافی را می‌توان جبران کرد. هاینتربرگر و همکاران (۲۰۰۷) به طور خاص برای شبیه‌سازی جریان متلاطم ناشی از یک ناحیه مرده مانع شکل (و نه حفره‌ای)، نشان دادند که مدل LES می‌تواند سودمند باشد (Hinterberger et al., 2007).

مطالعه گردابه‌های جریان در نواحی مرده در مطالعات زیست-محیطی بسیار اهمیت دارد، زیرا تاثیر شکل گردابه‌های جریان و تعداد آن‌ها، در داخل ناحیه مرده در به دام اندازی آلاینده‌ها و تقویت توان خودپالایندگی رودخانه بسیار بااهمیت است. نواحی مرده کناری جزء مناطق ذخیره اصلی در محیط زیست رودخانه هستند که نوع تبادل جریان در کانال اصلی می‌تواند نوع جریان در این نواحی را به شدت تحت تاثیر خود قرار دهد. از آنجایی که تا کنون تاثیر کانال با حفره-های متقارن در این نواحی مورد بررسی قرار نگرفته است، هدف از اجرای این پژوهش، بررسی الگوی جریان در داخل نواحی مرده کناری متقارن در یک کانال آزمایشگاهی است. برای رسیدن به این هدف، با استفاده از یک کانال آزمایشگاهی، عملکرد ناحیه مرده جانبی مورد مطالعه قرار گرفت و سرعت جریان با استفاده از روش پردازش تصویر اندازه‌گیری شد. سپس جریان در کانال نیز با استفاده از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با نام STAR-CCM+ مورد مدل‌سازی قرار گرفت. در نهایت داده‌های آزمایشگاهی و داده-های عددی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مدل فیزیکی

برای ساخت حفره‌های مستطیلی، از یک کانال شیشه‌ای استفاده گردید. شکل ۲ کانال و طرح شماتیک آن را نشان می‌دهد. حفره‌ها با استفاده از شیشه به صورت متقارن در دو طرف کانال ساخته شدند. طول و عرض کانال با مقطع مستطیلی به ترتیب برابر 10 متر و $0/83$

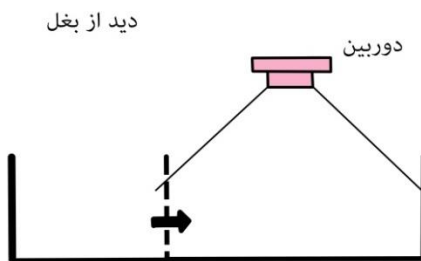


شکل ۲- کانال آزمایشگاهی و طرح شماتیک آن

جدول ۱- ابعاد و مختصات حفره‌های ساخته شده نسبت به مبدا مختصات در نظر گرفته شده

شماره ناحیه	طول حفره (m)	عرض حفره (m)	W/L (m)	(x, y)* (cm)
۱	۰/۹۵	۰/۴۵	۰/۴۷	(۱۱۶۰, ۳۱۵۳) (۳۱۶۵, ۶۱۵۴) (۶۱۶۵, ۸۴۶۰)
۲	۰/۷۵	۰/۴۵	۰/۶	(۱۱۵,۵۹) (۱۳۴,۵۲) (۱۳۴,۶۵) (۱۵۰,۵۲) (۱۵۰,۶۵) (۱۷۰,۵۹)
۳	۰/۵۵	۰/۴۵	۰/۸۱	(۱۱۵,۵۹) (۱۳۴,۵۲) (۱۳۴,۶۵) (۱۵۰,۵۲) (۱۵۰,۶۵) (۱۷۰,۵۹)
۴	۰/۳۵	۰/۴۵	۱/۲۸	(۱۱۵,۵۹) (۱۳۴,۵۲) (۱۳۴,۶۵) (۱۵۰,۵۲) (۱۵۰,۶۵) (۱۷۰,۵۹)
۵	۰/۱۵	۰/۴۵	۳	(۳۱۴,۶۳) (۳۱۵,۵۱)

* X نشان دهنده طول در جهت کانال اصلی و Y نشان دهنده طول در جهت عمود بر جهت کانال اصلی (مبدا مختصات در شکل شماتیک ۲ نشان داده شده است).



شکل ۳- طرح شماتیک از نحوه ضبط ویدیو توسط دوربین

تصویری ۳۰ فریم بر ثانیه (۶۰ HZ) استفاده گردید. شکل ۳ طرح شماتیکی از نحوه ضبط تصاویر با دوربین در داخل حفره را نشان می‌دهد. تابع کلاریسون عرضی شدت تصویر بین دو تصویر متوالی با استفاده از PIVLab در دامنه فرکانس فوریه سریع انتقالی^۱ (FFT) حل گردید. دقت رندوم برای PIVLab برابر ۰/۰۲ پیکسل در هر فریم اعلام شده است (Thielicke & Stamhuis, 2014).

آنالیز داده ها با مدل PIVLab:

PIVLab برای آنالیز داده‌های پردازش تصویر در مطالعاتی که سرعت جریان در آن‌ها بالا بوده است (Baker, Barker, & Gray, 2016; Sarno, Carravetta, Martino, Papa, & Tai, 2017) مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج مطلوبی را در بر داشته است. در پژوهش حاضر برای اندازه گیری سرعت، کف تمام نواحی با رنگ سفید پوشانده شد و سپس با استفاده از رنگ قرمز خوراکی به عنوان ماده ردیاب اندازه گیری ها انجام گرفت. برای ثبت تصاویر از دوربینی با قدرت تفکیک پذیری ۸ مگاپیکسل (۲۴۴۸*۳۲۶۴) با فرکانس

1- Fast Fourier Transform

توسعه معادلات حاکم بر مسئله

در پژوهش حاضر، برای ساده‌سازی مسئله از دو فرض استفاده شد. الف) چگالی جریان ثابت و در نتیجه آن جریان تراکم‌ناپذیر و در تمام نقاط هم‌دما^۱ است. ب) در جریان ایزوترم، ویسکوزیته جریان ثابت و سیال نیوتنی فرض می‌شود. این معادلات به طور کامل توصیف‌کننده شرایط ناپایدار، سرعت سه بعدی و میدان فشار است (Drost, 2012). رابطه^۲ پیوستگی و رابطه^۳ اندازه حرکت در جهت اختیاری i است.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

که در آن: U_i : مولفه سرعت لحظه‌ای در جهت i ، ν : لزوجت مولکولی (دینامیکی) سیال، ρ : چگالی (جرم مخصوص) سیال، P : فشار در هر نقطه از سیال است.

معرفی نرم‌افزار STAR-CCM+

برای شبیه‌سازی جریان سه بعدی غیر ماندگار از نرم‌افزار STAR-CCM+ استفاده شد. تحلیل جریان سیال به روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است و بر اساس روش گسسته‌سازی احجام محدود عمل می‌کند (User Guide, 2009). برای اجرای مدل از یک پردازشگر ده هسته‌ای در دانشگاه UBO فرانسه استفاده گردید.

شبکه‌بندی

ابتدا محدوده سه بعدی سازه مورد نظر در نرم‌افزار AutoCad توجه به ابعاد مدل رسم و پس از آن فایل اتوکد در محیط STAR-CCM+ فراخوانی شد. شبکه‌بندی سه بعدی مدل به طور شش ضلعی با ابعاد اولیه 0.5 متر تعیین شد. مقدار اولیه ابعاد شبکه با استفاده از نتایج بررسی‌های دروست (Drost, 2012) تعیین شد. مدل STAR-CCM+ پس از تعیین مقادیر اولیه در شبکه‌بندی، به صورت خودکار چندین تکرار انجام می‌دهد^۲ و سرانجام بهترین حالت شبکه را با توجه به شرایط آزمایش تعیین می‌کند.

مشخصات میدان حل

برای شرایط اولیه^۳، میزان دبی معادل $7/8$ لیتر بر ثانیه لحاظ شد. برای شرایط مرزی^۴، پارامترهای مدل به صورت زیر اعمال شد.

- 1- isothermal
- 2- Remesher
- 3- Initial Condition
- 4- Boundary Condition

شرایط مرزی ورودی^۵ برای مدل تلاطم شامل چگالی و شدت جریان a و شرایط مرزی خروجی^۶ بدلیل وجود یک سرریز در پایین دست کانال به صورت ریزشی انتخاب شد. شرایط مرزی برای تنش برشی در دیواره‌های جانبی، کناره‌های کانال اصلی و نواحی مرده و کف کانال به صورت دیواره بدون لغزش^۷ لحاظ گردید. به منظور شبیه‌سازی جریان آزاد با عدد فرود کم، شرایط مرزی سطح آب به صورت slip در نظر گرفته شد.

۳در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی جریان متلاطم از مدل LES استفاده گردید. مدل LES تمام ساختارهای آشفتگی جریان را که به واسطه الگوریتم‌های شبکه‌بندی ایجاد می‌شود، محاسبه می‌کند. مدل ذاتاً سه بعدی و تابع زمان است و نوسان‌ها با شرایط مرزی ورودی و خروجی مقاربه می‌شوند. نرم افزار STAR-CCM+ استفاده از روش LES بر اساس روش ضریب اسماکورینسکی عمل می‌کند (User Guide, 2009).

پس از انتخاب نوع مدل شبیه‌سازی جریان، باید مدل آشفتگی مرتبط با آن نیز تعیین گردد. مدل STAR-CCM+ این اختیار را به کاربر می‌دهد تا با توجه به پدیده فیزیکی حاکم بر جریان، مدل آشفتگی را از بین انواع مختلف مدل‌های آشفتگی تعیین شده (مدل-های صفر معادله‌ای، یک معادله‌ای و دو معادله‌ای) انتخاب کند. در پژوهش حاضر با توجه به ماهیت جریان نوع مدل آشفتگی مرتبط، مدل دو معادله‌ای K- ϵ انتخاب شد.

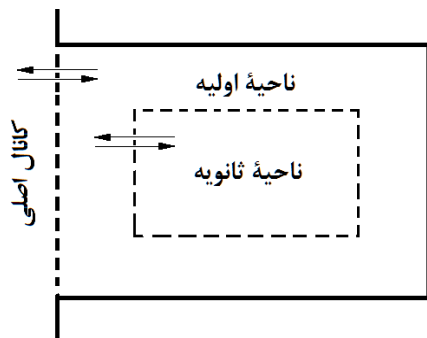
مدل‌های دو معادله‌ای

مقیاس طول در این مدل‌ها بیانگر اندازه گردابه‌های بزرگ دارای انرژی جنبشی است که باعث انتقال آشفتگی در توده سیال می‌شود. از مهم‌ترین مدل‌های دو معادله‌ای، مدل K- ϵ را می‌توان نام برد (User Guide, 2009). در نواحی مرده در سرعت‌های پایین، ناحیه‌ای گردابه‌ای با هسته‌ای مشخص در مرکز ناحیه ایجاد می‌شود که با ناحیه‌ای با مومنتوم بالاتر محصور شده است. در نتیجه این پدیده، ناحیه مرده به دو ناحیه اولیه و ثانویه تقسیم می‌شود (شکل ۴). ناحیه اولیه به طور مستقیم با کانال اصلی تبادل دارد و ناحیه ثانویه با ناحیه اولیه (Weitbrecht et al., 2008).

نتایج و بحث

برای بررسی توانایی نرم‌افزار STARCCM+ جهت شبیه‌سازی جریان در داخل نواحی مرده کناری، از مدل LES استفاده گردید

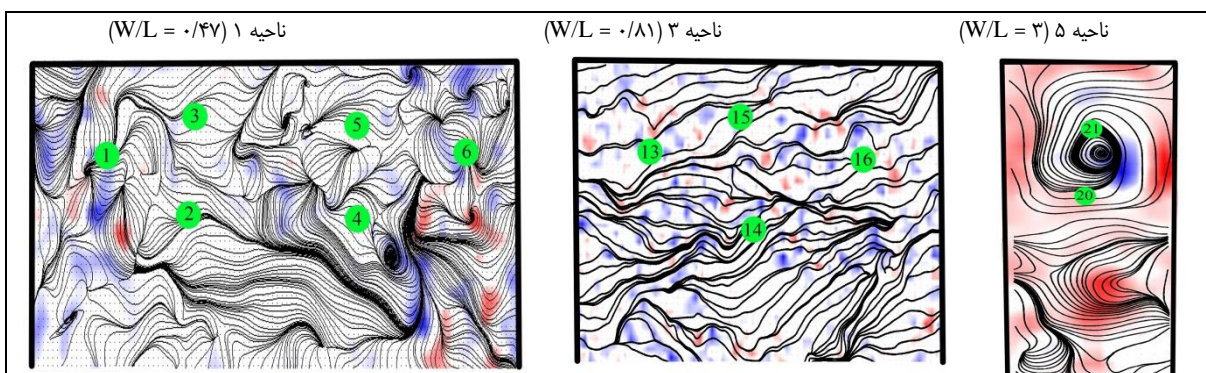
- 5- Inlet
- 6- Outlet
- 7- No-Slip



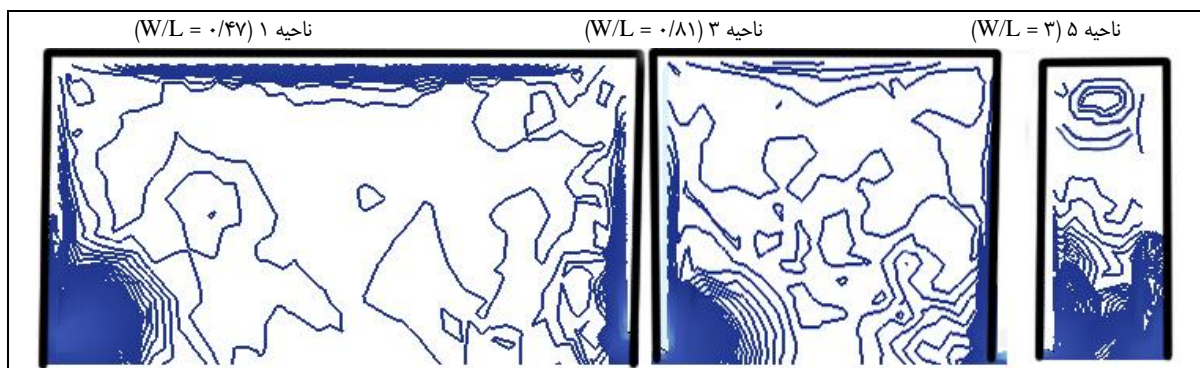
شکل ۴- ناحیه اولیه و ثانویه شکل گرفته در داخل ناحیه مرده

(بانژاد و همکاران، ۱۳۹۶).

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب خطوط جریان رسم شده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و با استفاده از نتایج مدل عددی، برای نواحی یک، سه و پنج را نشان می‌دهد. این نتایج برای شرایط جریان متلاطم با ارتفاع آب ۱۲ سانتی‌متر و دبی ۷/۸ لیتر بر ثانیه می‌باشد. گردابه‌های با چرخش در جهت عقربه‌های ساعت با رنگ قرمز و در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت با رنگ آبی نشان داده شده‌اند.



شکل ۵- الگوی جریان به دست آمده با استفاده از LSPIV در سه ناحیه یک، سه و پنج با نسبت ابعاد به ترتیب برابر (۰/۴۷، ۰/۸۱ و ۳).



شکل ۶- الگوی جریان شبیه سازی شده با استفاده از مدل STARCCM+ در سه ناحیه یک، سه و پنج با نسبت ابعاد به ترتیب برابر (۰/۴۷، ۰/۸۱ و ۳).

ناحیه پنجم، هم در مطالعه آزمایشگاهی و هم در نتایج عددی دو گردابه اولیه و ثانویه مشاهده شد که در تطابق کامل با نتایج مطالعات ویتربچت و همکاران (۲۰۰۸) و میگنو و همکاران (۲۰۱۷) برای نواحی با نسبت ابعاد بیشتر از یک است. علت این موضوع افزایش شدت تلاطم ناشی از تبادل جریان بین دو ناحیه می‌باشد. شدت تلاطم^۱ به صورت نسبت سرعت RMS بر سرعت برشی (or Ux/U^*)

مقایسه دو شکل ۵ و ۶ نشان می‌دهد که در ناحیه ۱ و ۳ گردابه‌های پراکنده ایجاد شده اند که مدل عددی نیز آن را تایید می‌کند. بر خلاف نتایج حاصل از مطالعات پیشین که برای نواحی مرده کناری با نسبت ابعاد کمتر از یک، در کانال با حفره‌های نامتقارن، ایجاد یک گردابه اولیه مرکزی را گزارش کرده‌اند (Weitbrecht et al., 2008). در مطالعه حاضر در این نواحی گردابه اولیه چه در داده‌های حاصل از پردازش تصویر (شکل ۵) و چه در داده‌های حاصل از مدل عددی (شکل ۶) مشاهده نشد. حال آن‌که در

1- Streamlines, gyres and turbulence intensity

U_y/U^* تعریف می‌شود. در ادامه داده‌های مربوط به شدت تلاطم محاسبه شده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شدت تلاطم در ناحیه مرزی بین کانال اصلی و ناحیه مرده، برای هر دو سری داده آزمایشگاهی و مدل سازی شده محاسبه گردید (شکل ۷). نتایج نشان می‌دهد که شدت تلاطم بیشینه با کاهش نسبت ابعاد حفره (بزرگتر شدن ابعاد حفره) افزایش می‌یابد و در نواحی ۱ و ۳ شدت تلاطم بیشتر از ناحیه ۵ است (شکل ۷). محدوده شدت تلاطم در نواحی با ابعاد بزرگتر سه برابر بیشینه شدت تلاطم در نواحی با ابعاد کوچکتر است (شکل ۷). همچنین نتایج نشان داد که بیشینه شدت تلاطم در مرز بین دو ناحیه ایجاد شده است. ویتربجت و همکاران (۲۰۰۸) نیز در آزمایشی که در آن فقط سه حفره در یک سمت کانال وجود داشت (شرایط حفره‌های نامتقارن)، نشان دادند که بیشینه تلاطم در مرز بین کانال اصلی و حفره ایجاد می‌شود. مرز دو ناحیه محل تبادل جریان بین کانال اصلی و داخل حفره است. در کانال متقارن، به دلیل وجود حفره‌ها در مقابل هم، این تبادل جریان علاوه بر بین کانال اصلی و حفره، تحت تاثیر حفره متقارن هم قرار می‌گیرد. از آنجایی که تقارن کانال از نوآوری‌های پژوهش حاضر است. بیشینه شدت تلاطم فقط با بیشینه شدت تلاطم در کانال نامتقارن در پژوهش‌های پیشین، مورد مقایسه قرار گرفت.

مقایسه داده‌های مدل با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد، که برای ناحیه شماره یک (با $W/L=0.47$) شبیه‌سازی به خوبی انجام نگرفته است و رنج داده‌های محاسبه شده توسط مدل کمتر از مقدار واقعی است. اما در دو ناحیه دیگر این تفاوت کمتر است و داده‌ها به هم نزدیک‌تر هستند. علت این امر، بالا بودن شدت تلاطم در این ناحیه و نزدیک شدن جریان به حالت جریان سه بعدی می‌تواند باشد. از این رو روش پردازش تصویر به خوبی نتوانسته است اندازه‌گیری را انجام دهد.

مقایسه نتایج شکل ۷ با شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که در ناحیه پنج به دلیل کوچکتر شدن ابعاد حفره (افزایش نسبت ابعاد) شدت تلاطم کمترین میزان را دارا است. با کم شدن شدت تلاطم، جریان فرصت کافی برای شکل‌گیری را نداشته است و در نتیجه گردابه‌های اولیه و ثانویه به خوبی قابل مشاهده است. به همین دلیل است که در این ناحیه شدت تلاطم اندازه‌گیری شده با شبیه‌سازی شده بیشترین نزدیکی را دارند.

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شد، بیشینه سرعت جریان در مرز بین کانال اصلی و ناحیه مرده رخ داد و سرعت متوسط جریان با ورود به نواحی مرده کمتر شد. این پدیده می‌تواند ناشی از آن باشد که ناحیه مرده کناری با ایجاد مانع در مسیر جریان باعث افزایش سرعت و شتاب جریان می‌شود. در نتیجه، این شتاب گرفتن جریان باعث جدایی بیشتر جریان و افزایش گردانیدن سرعت در نزدیکی گوشه‌های بالادست ناحیه مرده و در لایه اختلاطی شده است. در شکل‌های ۵ و

۶ تراکم بیشتر خطوط جریان در ورودی حفره‌ها نشان دهنده همین موضوع است. در این حالت، ناحیه کم‌سرعت به صورت ناحیه‌ای چرخشی ظاهر می‌شود که علت آن جدایی جریان ناشی از گردانیدن طولی فشار است؛ این نتایج با نتایج حاصل از پژوهش‌های جیرکا (Jirka, 2001) و کوین و همکاران (Kevin et al., 2014) همخوانی دارد که نوع جریان را در نواحی مرده از نوع جریان‌های ثانویه و بازچرخشی^۱ اعلام کرده‌اند.

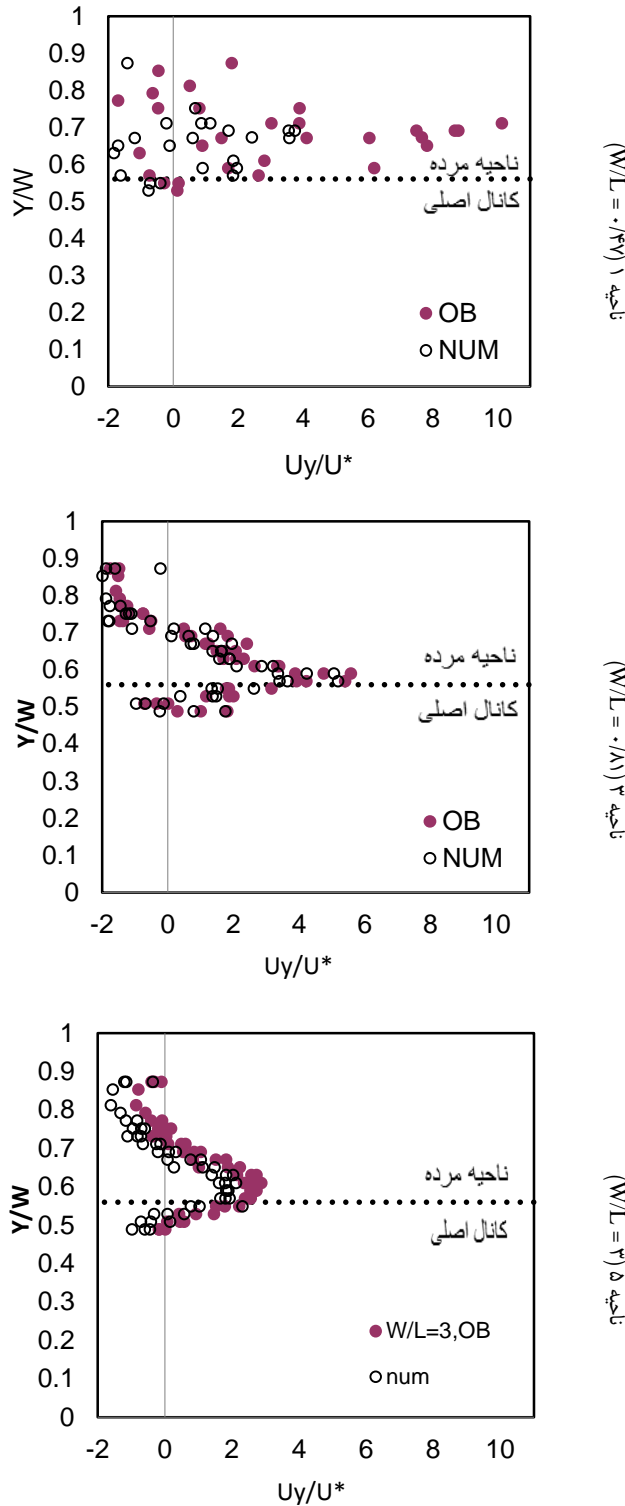
مقایسه شکل‌های ۵ تا ۷ نشان می‌دهد که سرعت بیشینه در جهت عرض کانال (U_y) در مرز بین کانال اصلی و ناحیه مرده نیز در شکل‌گیری گردابه‌ها اهمیت دارد. در لایه‌های اختلاطی کلاسیک، راستای جریان در هر دو ناحیه پر سرعت و کم سرعت به سمت پایین دست (مثبت طولی) است که در لایه اختلاطی ایجاد شده در نواحی مرده چنین نیست. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان نوسان اغتشاش‌ها در داخل لایه برشی قوی ایجاد شده در مرز بین کانال اصلی و حفره‌ها (محل ورود جریان به داخل حفره) بوده است. علت این مسئله را می‌توان این گونه بیان کرد که بعضی از گردابه‌های بزرگ مقیاس ایجاد شده در داخل لایه اختلاطی تحت تاثیر همین دیواره‌ها ایجاد شده‌اند و بهترین معیار برای سنجش آن، مقایسه نسبت U_y/U^* در مرز بین کانال اصلی و ناحیه مرده است (شکل ۷). این نتیجه‌گیری با نتایج بررسی‌های جکسون و همکاران (Jackson et al., 2012) مطابقت دارد، این محققین ادعان داشتند که در نواحی مرده کناری، مکانیسم شکل‌گیری لایه‌های اختلاطی کلاسیک و معیار سنجش، سرعت در راستای عرضی (U_y) است.

شکل ۸ نتایج حاصل از مدل برای شبیه‌سازی جریان در تمام نواحی کانال را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه در محدوده‌ی عدد رینولدز در محدوده‌ی مطالعات قبلی است (ویتربجت و همکاران (۲۰۰۸) و میگنو و همکاران (۲۰۱۷)) اما از آنجایی که شکل کانال در این پژوهش به صورت متقارن است، شدت تلاطم بسیار بیشتر از مطالعات پیشین است. افزایش شدت تلاطم ناشی از ایجاد تقارن در کانال، به شکل‌گیری گردابه‌های ثانویه و در نتیجه افزایش زمان مانایی کمک می‌کند. این تاثیر مثبت در نواحی با ابعاد کوچکتر بیشتر از نواحی با ابعاد بزرگتر مشاهده شد. همچنین نتایج حاصل نشان داد که زمان مانایی در حضور گردابه‌های ثانویه افزایش پیدا می‌کند. که این نتیجه با نتیجه حاصل از پژوهش جکسون و همکاران، ۲۰۱۲ همخوانی دارد.

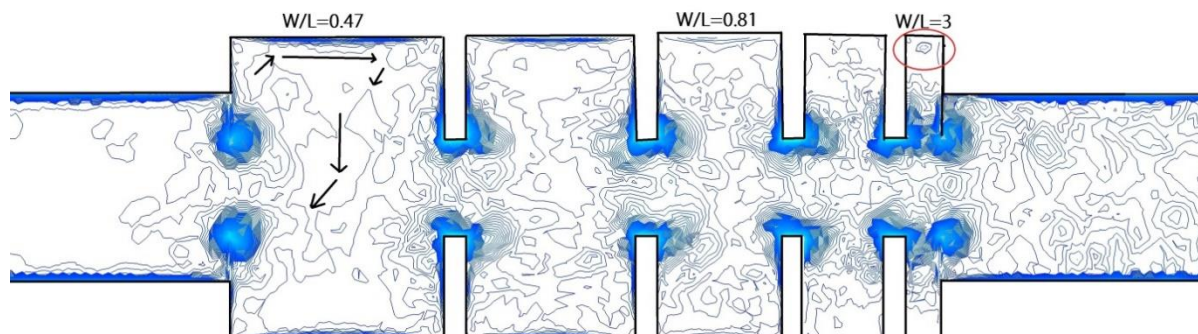
شکل ۸ نشان می‌دهد که تاثیر کانال متقارن بر شکل جریان در داخل حفره بسیار حائز اهمیت است. در ناحیه یک ($W/L=0.47$) در این شکل، گردابه اولیه در داخل ناحیه شکل گرفته است و به دلیل

می‌شویم (نواحی با ابعاد کوچکتر) این تبادل جریان با کانال اصلی کاهش می‌یابد. در ناحیه پنجم ($W/L=3$) این تاثیرپذیری از کانال اصلی به حداقل رسیده است.

تلاطم بالای ناشی از متقارن بودن کامل، فرصت بسته شدن پیدا نکرده است و محدوده آن تا ناحیه متقارن روبرو ادامه پیدا کرده است. این الگو در بقیه نواحی نیز وجود دارد و هرچه به انتهای کانال نزدیک



شکل ۷- مقایسه شدت تلاطم مدل سازی شده با شدت تلاطم محاسبه شده از داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۸- نتایج حاصل برای الگوی جریان سطح آب مدل سازی شده توسط مدل عددی STARCCM+

granular avalanches. *Journal of Fluid Mechanics*. 787. 367-395.

Chanson, H. 2004. *Environmental Hydraulics of Open Channel Flows*. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House. Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK.

Constantinescu, G., Sukhodolov, A. and McCoy, A. 2009. Mass Exchange in a Shallow Channel Flow with a Series of Groynes: LES Study and Comparison with Laboratory and Field Experiments. *Environment Fluid Mechanic*. 9, 587-615.

Drost, K. J. 2012. RANS and LES Predictions of Turbulent Scalar Transport in Dead Zones of Natural Streams. M. Sc. Thesis. Faculty of Environmental Hydraulic. Oregon State University. US.

Gualtieri, C., Jiménez, P. and Rodríguez, J. 2010. Modeling Turbulence and Solute Transport in a Square Dead Zone. *Proceedings of the International Association of Hydraulic Research (IAHR)*. European Congress. Apr. 12-16. Edinburgh. Gran Bretagna. 94-101.

Hinterberger, C., Frohlich, J. and Rodi, W. 2007. Three-Dimensional and Depth Averaged Large-Eddy Simulations of Some Shallow Water Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133, 857-863.

Jackson, T. R., Haggerty, R. Apte, S. V. Coleman, A. and Drost, K. J. 2012. Defining and Measuring the Mean Residence Time of Lateral Surface Transient Storage Zones in Small Streams. *Water Resources Researches*. 48(10): 105-115.

Jirka, G. H. 2001. Large Scale Flow Structures and Mixing Processes in Shallow Flows. *Journal of Hydraulic Research*. 39(6): 567-574.

Kevin, J., Drost, K. J., Sourabh, V., Apte, S. V., Haggerty, R. and Jackson, T. 2014. Parameterization of Mean Residence Times in Idealized Rectangular Dead Zones Representative of Natural Streams. *Journal of Hydraulic Engineering*. 140, 1-14.

McCoy, A., Constantinescu, G., and Weber, L. J. 2008. Numerical investigation of flow hydrodynamics in a

به طوری که گردابه اولیه ایجاد شده نتوانسته است تمام ناحیه را در بر بگیرد و فضا را برای ایجاد گردابه ثانویه در قسمت انتهایی ناحیه محیا کرده است (ناحیه مشخص شده با دایره قرمز در شکل ۸).

نتیجه گیری

مقایسه نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل سازی شده برای سه ناحیه، نشان داد که در مجموع مدل عددی با دقت قابل قبولی توانسته‌است جریان را شبیه‌سازی کند. پس از حصول اطمینان از دقت مدل برای شبیه‌سازی سه ناحیه، نتایج حاصل از مدل برای شبیه‌سازی جریان در بقیه نواحی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در کانال با نواحی متقارن (روبه رو) به دلیل کاهش عرض کانال اصلی تبادل جریان در نواحی مقابل هم رخ می‌دهد که این پدیده باعث افزایش شدت تلاطم در داخل نواحی مرده می‌شود. در کانال‌های با حفره‌های نامتقارن (حفره‌ها فقط در یک سمت کانال) این نتایج مشاهده نشده است (ویتربچت و همکاران، ۲۰۰۸ و میگنو و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین نتایج حاصل نشان داد که نوع گردابه‌های ایجاد شده در نواحی با نسبت ابعاد کمتر از یک، به شدت تحت تاثیر شکل کانال قرار گرفت و متفاوت از نتایج گزارش شده توسط ویتربچت و همکاران (۲۰۰۸) و میگنو و همکاران (۲۰۱۷) بود. اما در نواحی با نسبت ابعاد بیشتر از یک نتیجه حاصل در تطابق کامل با مطالعات پیشین قرار دارد.

به نظر می‌رسد با ایجاد تغییر در شکل حفره از حالت منظم مستطیلی به نامنظم، می‌توان تاثیر بیشتری بر شدت تلاطم و شکل گردابه‌های ایجاد شده در هر حفره گذاشت. در صورت وجود آلاینده در کانال اصلی، افزایش تعداد گردابه‌های ثانویه، به افزایش زمان ماندایی و در نتیجه افزایش توان خودپالایی رودخانه کمک خواهد کرد.

منابع

Baker, JL., Barker, T., Gray, JMNT. 2016. A two-dimensional depth-averaged $\mu(I)$ -rheology for dense

- User Guide. 2009. Star-ccm+ version 4.04. 011.
- Valentine, E. and Wood, I. 1979. Dispersion in Rough Rectangular Channels. Hydraulic Division. 105(12): 1537-1553.
- Van Balen, W., Uijtewaal, W. S. J. and Blanckaert, K. 2009. Large-Eddy Simulation of a Mildly Curved Open-Channel Flow. Journal of Fluid Mechanics. 630(1): 413-442.
- Weitbrecht, V., Socolofsky, S. and Jirka, G. 2008. Experiments on Mass Exchange Between Groin Fields and Main Stream in Rivers. Hydraulic Engineering. 2, 173-183.
- channel with a series of groynes. Journal of Hydraulic Engineering, 134(2): 157-172.
- Rossi, R. and Iaccarino, G. 2009. Numerical Simulation of Scalar Dispersion Downstream of a Square Obstacle Using Gradient-Transport Type Models. Atmospheric Environment. 43(16): 2518-2531.
- Sarno, L., Carravetta, A., Martino, R., Papa, MN., Tai, Y-C., 2017. Some considerations on numerical schemes for treating hyperbolicity issues in two-layer models. Advances in water resources. 100. 183-198
- Thielicke, W and Stamhuis, E J 2014 PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. Journal of Open Research Software, 2: e30

Experimental and Numerical Study of flow Patterns and Turbulence Intensity in Lateral Dead Zone in a Symmetric Channel

H. Banejad¹, H. Nozari^{*2}, Farzaneh GHAemizadeh³, Blaise Nsom⁴

Received: Oct.09, 2018

Accepted: Jan.10, 2018

Abstract

Lateral cavities are major storage zones in riverine environments for which the mass exchanges with the main stream strongly affect the characteristics of the habitat in these dead zones. An experimental and numerical work is presented here for ten regular dead zones in a controlled symmetric open-channel. Lateral dead zones were in a different aspect ratio and water surface velocity was determined by image processing. For numerical simulation, STARCCM+ was used under LES condition. Flow pattern and turbulence intensity figures were calculated from the Image processing results and numerical data. Our results showed that the maximum intensity was obtained in boundary of main channel and dead zone, also its value increases by decreasing the aspect ratio of cavity. Maximum intensity in cavity with aspect ratio less than one, was 3 times above the cavity with aspect ratio less than one. In addition, gyres formed in regions with an aspect ratio less than one were strongly affected by the shape of the channel and no initial gyre was observed. However, in regions with aspect ratio more than one, the primary and secondary gyres were formed.

Key words: Flow Pattern, Turbulence Intensity, Turbulence Model, Dead Zone

1- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali SINA University, Hamadan, Iran

3-Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali SINA University, Hamadan, Iran

4- Professor, Université de Bretagne Occidentale, IUT de Brest-Morlaix, Institut de Recherche Dupuy de Lome, IRDL/UBO FRE CNRS 3744, 29200 Brest, France

(* - Corresponding Author Email: h.nozari@basu.ac.ir)