

## شبیه‌سازی عددی جریان در نواحی مرده مستطیلی کانال آبیاری با استفاده از مدل STAR-CCM+

حسین بانژاد، حامد نوذری و فرزانه قائمی‌زاده\*\*

\* نگارنده مسئول: گروه علوم مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. تلفن: ۳۸۲۲۹۷۷ (۰۸۱)،  
پیام‌نگار: ghaemizadeh\_farzaneh@yahoo.com  
\*\* به ترتیب: دانشیار گروه علوم مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد؛ استادیار؛ و دانشجوی دکتری گروه علوم مهندسی آب، دانشگاه  
بوعلی سینا  
تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۱۸

### چکیده

اهمیت مطالعه ناحیه مرده کناری از آنجا مشخص می‌شود که هنوز تأثیر آن بر مشخصات آشفستگی جریان به‌طور کامل شناخته شده نیست. تعداد این نواحی، نحوه قرار گرفتنشان نسبت به هم و نیز ابعاد هریک به تنهایی می‌تواند تأثیر متفاوتی بر الگوی جریان داشته باشد. در پژوهش حاضر تلاش شد تا کارایی نرم‌افزار STAR-CCM+ در مدل‌سازی جریان در حضور مجموعه‌ای از نواحی مرده به‌صورت سه‌بعدی بررسی شود. به‌همین منظور از نتایج مدل آزمایشگاهی موجود استفاده شد. واسنجی STAR-CCM+ برای تعیین بهترین نوع مدل آشفستگی انجام گرفت و سپس برای صحت‌سنجی از سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده در جهت عرض کانال، استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که شتاب گرفتن جریان در کانال اصلی باعث جدایی بیشتر جریان و افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی گوشه‌های بالادست ناحیه مرده می‌شود. سرعت متوسط جریان با ورود به نواحی مرده کمتر خواهد شد و ناحیه کم سرعت به‌صورت ناحیه‌ای چرخشی ظاهر می‌شود. بررسی الگوهای جریان در شبیه‌سازی گردابه‌های ایجاد شده ناشی از این سازه‌ها نشان می‌دهد که مدل دو ناحیه‌ای RANS کارایی بیشتری نسبت به مدل تک ناحیه‌ای RANS می‌تواند داشته باشد. اما در مجموع مدل LES بیشترین کارایی را در شبیه‌سازی جریان از خود نشان می‌دهد.

### واژه‌های کلیدی

الگوی جریان، شدت تلاطم، مدل تلاطمی، مدل دو ناحیه‌ای

### مقدمه

لحظه‌ای و مکانی آنها هنوز به‌طور کامل شناخته شده نیست و به مدل‌سازی عددی نیاز دارد (Jackson *et al.*, 2012). از مدل‌های آشفستگی موجود می‌توان مدل‌های RANS<sup>۱</sup>، DNS<sup>۲</sup> و LES<sup>۳</sup> (روش گردابه‌های بزرگ) را نام برد (Gualtieri *et al.*, 2010). روسی و ایاکارینو (Rossi & Iaccarino, 2009) از مدل RANS برای شبیه‌سازی الگوی جریان در اطراف یک مانع مربع شکل در وسط جریان استفاده شد؛ نتایج حاصل از این پژوهش

کناره‌های رودخانه‌ها<sup>۱</sup> صاف و مستقیم نیستند و انحناهایی در مسیر خود دارند که نواحی مرده جانبی<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند. وجود نواحی مرده در رودخانه‌ها نشان می‌دهد که تلاطم جریان در سرتاسر رودخانه همگن نیست (Chanson, 2004). لایه‌های اختلاطمی محاط بر نواحی جدایی جریان، مهم‌ترین ویژگی جریان در این نواحی است. مشخصات آشفستگی و به ویژه ساختارهای

1- River Banks

3- Reynolds Averaged Navier-Stokes

5- Large Eddy Simulation

2- Lateral Dead Zones

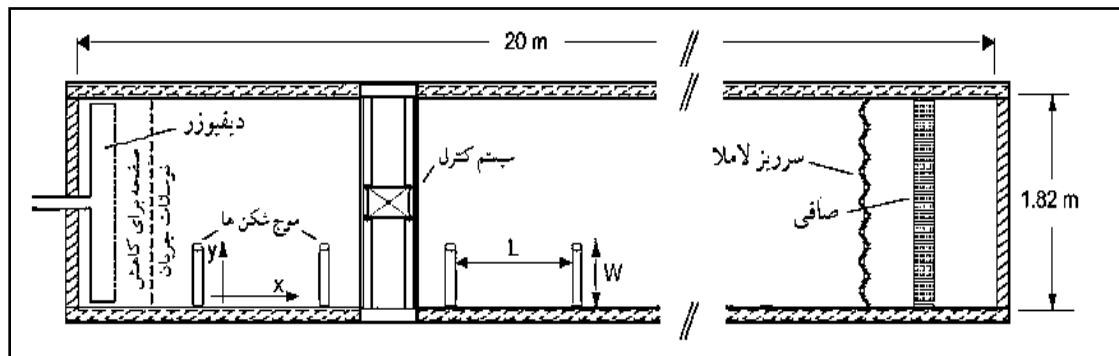
4- Direct Numerical Simulation

نواحی مرده هنوز به‌طور کامل شناخته شده نیست. مطالعه گردابه‌های جریان در این نواحی در مطالعات زیست‌محیطی بسیار اهمیت دارد، زیرا تأثیر شکل گردابه‌های جریان در ناحیه مرده در به دام‌اندازی آلاینده‌ها و تقویت توان خودپالیندگی رودخانه بسیار با اهمیت است. مدل مورد استفاده در این پژوهش (مدل STAR-CCM+) مدلی است بسیار کاربردی برای شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی، که در مطالعات علوم آب در ایران متأسفانه هنوز به‌خوبی شناخته نشده و مورد استفاده قرار نگرفته است. هدف از اجرای این پژوهش، معرفی و نشان دادن کارایی این مدل در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در نواحی مرده جانبی است.

#### مواد و روش‌ها

کانال مورد مطالعه یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۲۰ متر و عرض ۱/۸ متر واقع در آزمایشگاه دانشگاه Karlsruhe کشور آلمان است. در کف کانال با استفاده از ذرات پلاستیکی با ارتفاع زبری کمتر از ۰/۲ میلی‌متر یک زبری یکنواخت ایجاد و برای جلوگیری از ورود ذرات به داخل مخزن از یک سرریز لامبلا (که نوعی ماندرگر برای حذف مواد معلق از آب است) و یک صافی استفاده شده است. طرح شماتیک کانال آزمایشی در شکل ۱ و سایر مشخصات حفره‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. برای مطالعه تأثیر ابعاد حفره‌ها بر الگوی جریان، از ۸ ناحیه مرده به‌صورت سری در جداره کانال استفاده شده است (Weitbrecht *et al.*, 2008). برای ساخت نواحی مرده، از موانعی به‌صورت آب‌شکن<sup>۱</sup> و از صفحات مکعب مستطیل با ابعاد (۰/۵ × ۰/۵ × ۰/۵) متر استفاده شده است. سرعت متوسط جریان برابر ۰/۱۶ متر بر ثانیه و عمق آب در کانال اصلی، مرز دو ناحیه و داخل ناحیه مرده برابر و مساوی ۰/۴۶ متر بوده است ( $h_E=h_D=h_S$ ).

نشان داد که با توجه به اینکه شرایط حاکم بر جریان به‌صورت تک‌ناحیه‌ای است، مدل RANS کارایی مناسبی در شبیه‌سازی جریان دارد. ون بالن و همکاران (Van Balen *et al.*, 2009) نشان دادند که در جریان متلاطم، مدل LES در مقایسه با مدل RANS، سرعت متوسط را با دقت بیشتری شبیه‌سازی می‌کند. 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 اسمانگورینسکی، هزینه محاسباتی بیشتری دارد، اما به‌دلیل دقت بالاتر و استفاده از شبکه‌بندی بزرگ‌تر، هزینه محاسبات اضافی را می‌توان جبران کرد. به‌طور خاص برای شبیه‌سازی جریان متلاطم ناشی از یک ناحیه مرده مانع شکل (و نه حفره‌ای)، هاینتربرگر و همکاران (Hinterberger *et al.*, 2007) نشان دادند که مدل LES می‌تواند سودمند باشد. در پژوهش حاضر، برای شبیه‌سازی الگوی جریان در یک کانال آزمایشگاهی با هشت ناحیه مرده جانبی، از یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با نام STAR-CCM+ استفاده شد. یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در مدل عددی باید واسنجی شود تعیین نوع مدل شبیه‌سازی جریان و نیز مدل آشفتگی مرتبط با آن است. مدل STAR-CCM+ برای سه حالت مختلف ترکیب مدل شبیه‌سازی جریان با مدل آشفتگی شامل RANS1 (مدل تنش رینولدز در حالت  $k-\epsilon$  تک‌ناحیه‌ای)، RANS2 (در حالت  $k-\epsilon$  دوناحیه‌ای) و مدل LES (در حالت  $k-\epsilon$  دوناحیه‌ای) واسنجی شد. با استفاده از داده‌های مدل آزمایشگاهی موجود، مدل عددی صحت‌سنجی شد. همان‌طور که در بالا گفته شد، مشخصات آشفتگی و به‌ویژه ساختارهای لحظه‌ای و مکانی گردابه‌های جریان در



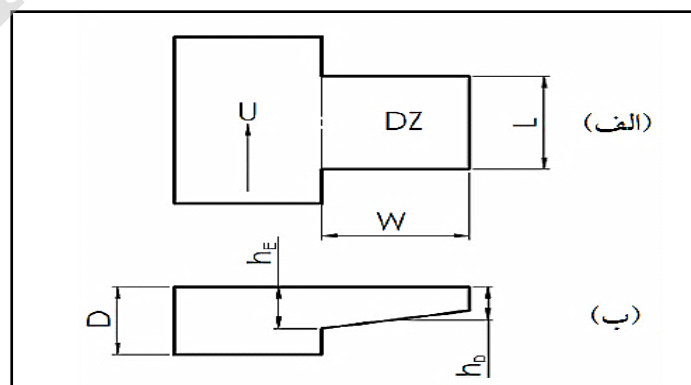
شکل ۱- طرح شماتیک از فلوم آزمایشگاهی

جدول ۱- خلاصه‌ای از پارامترهای آزمایشی

شماره	طول L (متر)	عرض W (متر)	W/L	سرعت U (متر بر ثانیه)	h <sub>S</sub> (متر)	h <sub>E</sub> (متر)	h <sub>D</sub> (متر)
۱	۱/۴۵	۰/۵	۰/۳۵	۰/۱۶	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۴۶
۲	۱/۲۵	۰/۵	۰/۴۰	۰/۱۶	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۴۶
۳	۱/۰۵	۰/۵	۰/۴۸	۰/۱۶	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۴۶
۴	۰/۸۵	۰/۵	۰/۵۹	۰/۱۶	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۴۶
۵	۰/۶۵	۰/۵	۰/۷۷	۰/۱۶	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۴۶
۶	۰/۴۵	۰/۵	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۴۶
۷	۰/۲۵	۰/۵	۲	۰/۱۶	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۴۶
۸	۰/۱۵	۰/۵	۳/۳۵	۰/۱۶	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۴۶

شکل ۲ طرح شماتیک ناحیه مرده در حالت پلان و همچنین برشی از سطح مقطع ناحیه را نشان می‌دهد. L طول ناحیه در جهت جریان<sup>۱</sup> و W عرض ناحیه در جهت عمود بر جریان است. Dz عمق جریان در ناحیه مرده است.

جریان متلاطم ( $Re > 2000$ )، چگالی جریان آزاد هوا  $1/277$  کیلوگرم بر متر مکعب، سرعت برشی  $1/2$  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.



شکل ۲- طرح شماتیک الف) ناحیه مرده در حالت پلان و ب) برشی از سطح مقطع ناحیه

### توسعه معادلات حاکم بر مسئله

در پژوهش حاضر، برای ساده‌سازی مسئله از دو فرض استفاده شد. فرض اول اینکه چگالی جریان ثابت و در نتیجه آن جریان تراکم‌ناپذیر و در تمام نقاط هم‌دما<sup>۱</sup> است. فرض دوم اینکه در جریان ایزوترم، ویسکوزیته جریان ثابت و سیال نیوتونی فرض می‌شود. این معادلات به‌طور کامل توصیف‌کننده شرایط ناپایدار، سرعت سه‌بعدی و میدان فشار است (Drost, 2012). رابطه ۱ پیوستگی و رابطه ۲ اندازه حرکت در جهت اختیاری  $i$  است.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

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

که در آن‌ها،

$U_i$  = مولفه سرعت لحظه‌ای در جهت  $i$ ;  $\nu$  = لزوجت مولکولی (دینامیکی) سیال؛  $\rho$  = چگالی (جرم مخصوص) سیال؛ و  $P$  = فشار در هر نقطه از سیال.

### معرفی نرم‌افزار STAR-CCM+

برای شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی غیرماندگار 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 (Anon, 2010). برای اجرای مدل از یک پردازشگر ده‌هسته‌ای به مدت ۱۵ روز در مرکز ملی ابررایانش شیخ‌بهایی دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده گردید.

### شبکه‌بندی

ابتدا محدوده سه‌بعدی سازه مورد نظر در نرم‌افزار AutoCad با توجه به ابعاد مدل رسم و پس از آن فایل اتوکد در محیط STAR-CCM+ فراخوانی شد. شبکه‌بندی سه‌بعدی مدل به‌طور شش ضلعی با ابعاد اولیه ۰/۰۵ 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، به‌صورت خودکار چندین تکرار انجام می‌دهد<sup>۲</sup> و سرانجام بهترین حالت شبکه را با توجه به شرایط آزمایش تعیین می‌کند (جدول ۲).

جدول ۲- مشخصات شبکه‌بندی نهایی مدل

تعداد گره	تعداد وجوه	تعداد سلول
۱۲۶۴۳۴۹	۱۸۲۶۱۱۴	۳۷۳۴۶۵

### مشخصات میدان حل

برای شرایط اولیه<sup>۳</sup>، سرعت متوسط جریان در بالادست معادل ۰/۱۶ متر بر ثانیه لحاظ شد. برای شرایط مرزی<sup>۴</sup>، پارامترهای مدل به‌صورت زیر اعمال شد. شرایط مرزی برای ورودی<sup>۵</sup> برای مدل تنش رینولدز شامل سرعت متوسط و برای مدل تلاطم شامل چگالی و شدت جریان

است. شرایط مرزی در خروجی<sup>۶</sup> به‌صورت ریزشی انتخاب شد چون در پایین‌دست کانال یک سرریز وجود دارد. شرایط مرزی برای تنش برشی در دیواره‌های جانبی، کناره‌های کانال اصلی و نواحی مرده و کف کانال به‌صورت دیواره بدون لغزش<sup>۷</sup> و زبری کف کانال برابر ۰/۰۲

1- Isothermal  
3- Initial Condition  
5- Inlet  
7- No-Slip

2- Remesher  
4- Boundary Condition  
6- Outlet

مربوط به تنش‌های رینولدزی است.

#### - مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)

در این مدل تمام ساختارهای آشفتگی جریان که به واسطه الگوریتم‌های شبکه‌بندی ایجاد می‌شود، محاسبه می‌شود. مدل ذاتاً سه‌بعدی و تابع زمان است و نوسان‌ها با شرایط مرزی ورودی و خروجی مقداردهی می‌شوند. برای محاسبه به یک CPU قوی نیاز است. مدل STAR-CCM+ در استفاده از روش LES بر اساس روش ضریب اسماکورینسکی عمل می‌کند (Anon, 2010). 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 تعبیه شده انتخاب کند.

#### - مدل‌های صفر معادله‌ای

در این مدل‌ها برای تعیین کمیت‌های آشفتگی از معادلات دیفرانسیلی استفاده نمی‌شود. از انواع این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های لزوجت گردابه‌ای ثابت<sup>۱</sup>، طول اختلال پراتنل<sup>۲</sup> و لایه برش آزاد پراتنل<sup>۳</sup> اشاره کرد.

#### - مدل‌های یک معادله‌ای

در این مدل‌ها از یک رابطه دیفرانسیلی بر حسب کمیت آشفتگی  $k$  استفاده می‌شود. تبادل بین کانال اصلی و ناحیه مرده تابع سرعت تبدالی در مرز دو ناحیه (E) است (رابطه ۷) (Valentine & Wood, 1979).

$$K = \frac{E}{U} \quad (7)$$

#### - مدل‌های دو معادله‌ای

مقیاس طول در این مدل‌ها بیانگر اندازه گردابه‌های بزرگ دارای انرژی جنبشی است که باعث انتقال آشفتگی

سانتی‌متر لحاظ گردید. برای شبیه‌سازی جریان آزاد با عدد فرود کم شرایط مرزی سطح آب به صورت slip در نظر گرفته شد.

#### انواع مدل‌های شبیه‌سازی جریان در مدل STAR-CCM+

##### - مدل تنش رینولدز

مدل متوسط رینولدز در ترکیب با معادلات ناویر-استوکس، متوسط رینولدز-ناویراستوکس (RANS) نامیده می‌شود. در روابط ۳ و ۴ علامت بار بالای کمیت‌ها مقادیر متوسط زمانی و علامت پریم مقادیر نوسانات را نشان می‌دهد. با جاگذاری این دو در معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس و ساده‌سازی با استفاده از قوانین میانگین‌گیری روابط ۵ و ۶ حاصل می‌شود.

$$u_i = \bar{u}_i + \bar{u}'_i \quad (3)$$

$$P = \bar{p} + \bar{p}' \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

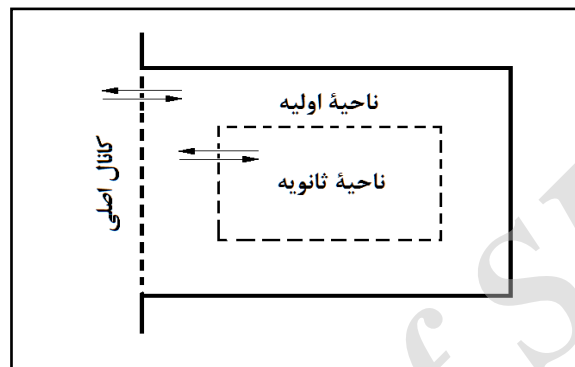
$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) \quad (6)$$

در رابطه اندازه حرکت (رابطه ۶)، عبارت  $\overline{\rho u'_i u'_j}$  تنش رینولدز اعمال شده بر سیال است و اثر گردابه‌های آشفتگی را نشان می‌دهد. در جریان‌های آشفته، مقدار تنش رینولدز بسیار بیشتر از تنش لزوجت مولکولی (دینامیکی)  $\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$  و تعیین آن نیز مشکل است. تنها تفاوت رابطه بالا با فرم معمولی معادلات ناویر-استوکس، اضافه شدن عبارت

1- Constant Eddy Viscosity Model  
3- Prandtl's Free Shear Layer Model

2- Prandtl Mixing-Length Model

در توده سیال می‌شود. از مهم‌ترین مدل‌های دو معادله‌ای، مدل K-ε را می‌توان نام برد (Anon, 2010). در نواحی مرده در سرعت‌های پایین، ناحیه‌ای گردابه‌ای با هسته‌ای مشخص در مرکز ناحیه ایجاد می‌شود که با ناحیه‌ای با مومنوم بالاتر محصور شده است. در نتیجه این پدیده، ناحیه مرده به دو ناحیه اولیه و ثانویه تقسیم می‌شود (شکل ۳). ناحیه اولیه به‌طور مستقیم با کانال اصلی تبادل دارد و ناحیه ثانویه با ناحیه اولیه (Weitbrecht et al., 2008). جدول ۳ مشخصات آزمایش‌های عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- ناحیه اولیه و ثانویه شکل گرفته در داخل ناحیه مرده

جدول ۳- شرایط حاکم بر آزمایش‌ها

مشخصات مدل‌های تلاطمی		آزمایش		
			K-ε	
Segregated Flow	RANS	Implicit unsteady	تک ناحیه	اول
Segregated Flow	RANS	Implicit unsteady	دو ناحیه	دوم
Segregated Flow	LES	Implicit unsteady	دو ناحیه	سوم

جریان، یعنی بررسی ویژگی‌های لایه اختلاطی و در حقیقت مدل‌سازی عددی آن پرداخته شده است و برداشت ویژگی‌های جریان در لایه اختلاطی در مطالعات آزمایشگاهی بسیار پیچیده است و امکان برداشت داده به تعداد بالا وجود ندارد، از این‌رو در مدل عددی تعداد گره‌ها بسیار بیشتر است تا در مدل آزمایشگاهی، بنابراین از نظر ژئومتری نمی‌توان به‌طور دقیق برای نقطه‌ای مشخص در مدل آزمایشگاهی، نقطه معادل را در مدل عددی در نظر گرفت و مقایسه کرد. در نتیجه برای نقطه‌ای مشخص در مدل آزمایشگاهی می‌توان بازه‌ای از سرعت را در مدل عددی معادل قرار داد. از این‌رو در مطالعات اینچنینی نیاز

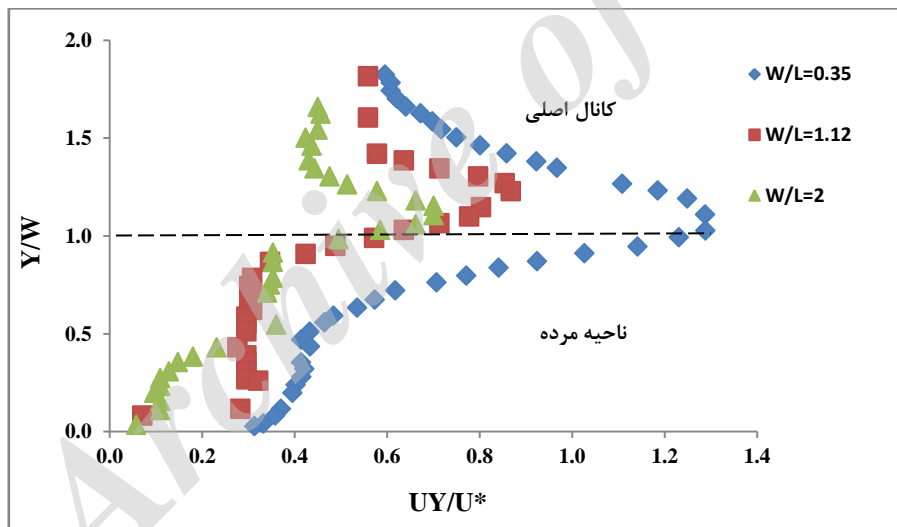
## نتایج و بحث

بررسی داده‌های اندازه‌گیری شده (شکل ۴) نشان می‌دهد که بیشترین شدت تلاطم ( $u_y/u_*$ ) در نزدیکی خروجی حفره و در مرز بین ناحیه مرده و کانال اصلی رخ داده است. این الگو تکرار شونده برای هر ۸ ناحیه ایجاد شده است.  $u_y$  سرعت لحظه‌ای در جهت عرض کانال،  $u_*$  سرعت برشی و  $y$  عرض کانال اصلی است. شدت بیشینه تلاطم با افزایش  $W/L$  (یعنی کوچک شدن ابعاد حفره) کاهش پیدا می‌کند که این پدیده می‌تواند ناشی از کم شدن فاصله بین دو دیواره حفره و طول لایه اختلاطی باشد (شکل ۴). در پژوهش حاضر به بررسی جزئی‌تر

آشفستگی (صفر معادله، تک معادله و دو معادله‌ای) انتخابی است. از این‌رو مدل‌های RANS1، RANS2 و LES برای تعیین مناسب‌ترین حالت برای شبیه‌سازی جریان در ناحیه مرده مقایسه شدند (جدول ۳). علاوه بر ابعاد هر ناحیه، اندازه سرعت جریان در داخل ناحیه مرده و همچنین خصوصیات جریان در کانال اصلی (که تابع سرعت و دبی جریان اصلی و نیز تحت تأثیر سایر نواحی مرده بالادست است) در شکل و تعداد گردابه‌های ایجاد شده در هر ناحیه تأثیرگذار است که بر اساس نوع گردابه‌های ایجاد شده تک‌ناحیه‌ای یا دوناحیه‌ای بودن مدل مشخص می‌شود.

به ارائه شاخص‌های آماری نخواهد بود. از جمله مقالات معتبر در این‌باره که برای صحت‌سنجی فقط از مقایسه نمودارها استفاده کرده‌اند می‌توان به مطالعات (McCoy *et al.*, 2008; Constantinescu *et al.*, 2009; Drost, 2012) اشاره کرد.

در این پژوهش به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌های آشفستگی، مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده برای سه ناحیه با  $W/L$  به ترتیب برابر  $0.35$ ،  $1.12$  و  $2$  به‌کار گرفته شد (شکل‌های ۵ تا ۷). علت تفاوت در نتایج حاصل از مدل‌ها، نخست وجود تفاوت در ساختار مدل‌های شبیه‌ساز جریان (مدل LES و مدل RANS) و پس از آن تفاوت در نوع مدل

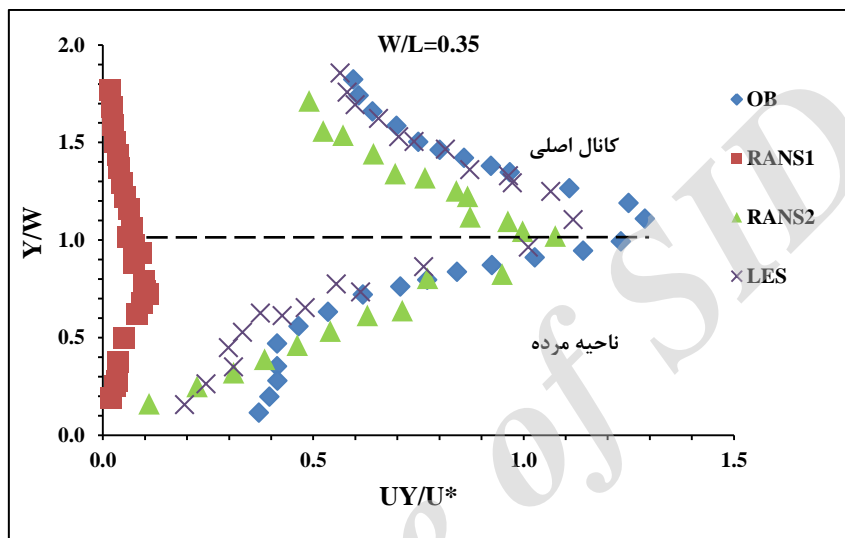


شکل ۴- مقادیر بدون بعد سرعت لحظه‌ای در جهت عرض کانال در مرز بین کانال اصلی و نواحی مرده کناری برای داده‌های اندازه‌گیری شده

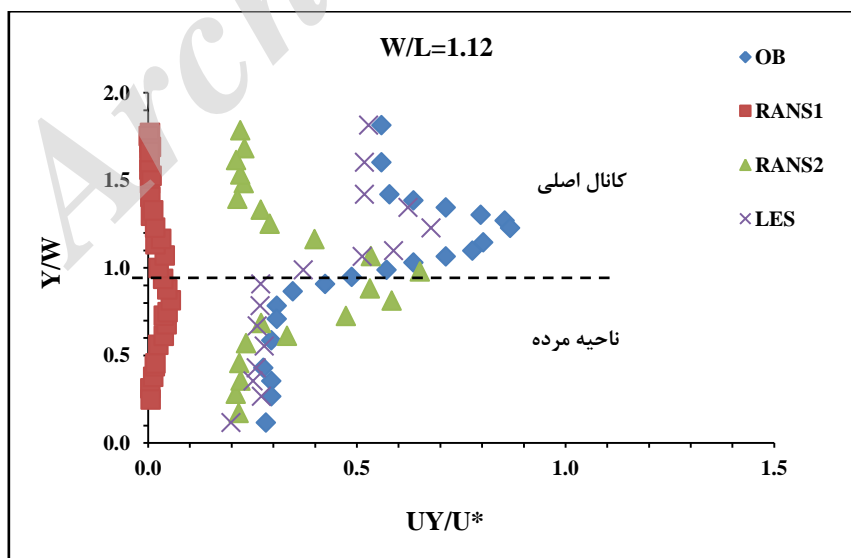
آزمایشگاهی (شکل ۴) تطابق بیشتری دارد. برای دو مدل RANS2 و LES، با کاهش ابعاد حفره (افزایش نسبت  $W/L$ )، تفاوت بین سرعت اندازه‌گیری شده با سرعت شبیه‌سازی شده بیشتر شده است. این تفاوت در مدل RANS2 بیشتر است. سرعت بیشینه به‌دست آمده در مرز بین ناحیه مرده و کانال اصلی، با استفاده از مدل

مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده (شکل ۴) با نتایج مدل‌های عددی (شکل‌های ۵ تا ۷) نشان می‌دهد که شدت تلاطم حاصل از مدل RANS1 بسیار کمتر از شدت تلاطم حاصل از داده‌های آزمایشگاهی است. اما شدت تلاطم به‌دست آمده با مدل‌های RANS2 و LES (شکل‌های ۶ و ۷) با شدت تلاطم به‌دست آمده داده‌های

RANS2 برای هر سه حفره کمتر از مقدار واقعی است. این مسئله می‌تواند ناشی از بزرگ بودن گردابه‌های ایجاد شده باشد. در مدل RANS اثر گردابه‌های آشفتگی در نظر گرفته می‌شود، اما مدل LES توانایی بیشتری در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ دارد، زیرا در آن ساختارهای آشفتگی جریان با الگوریتم‌های شبکه‌بندی ایجاد و محاسبه می‌شود و به همین دلیل نیز بیشینه سرعت به دست آمده با استفاده از مدل LES به مقدار واقعی نزدیک‌تر است (شکل‌های ۵ تا ۷).

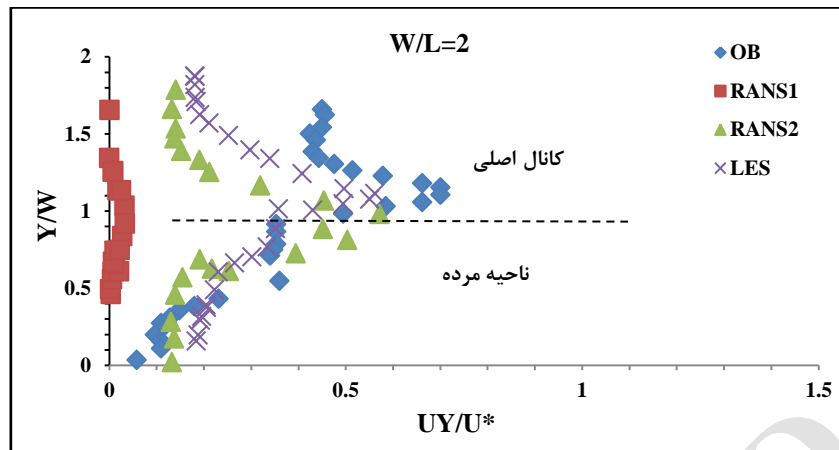


شکل ۵- مقادیر بدون بعد سرعت لحظه‌ای در جهت عرض کانال در مقطعی در مرز کانال اصلی و ناحیه مرده کناری با نسبت ابعاد  $W/L = 0.35$  برای داده‌های مشاهداتی (OB) و مدل‌سازی شده



شکل ۶- مقادیر بدون بعد سرعت لحظه‌ای در جهت عرض کانال در مقطعی در مرز کانال اصلی و ناحیه مرده کناری با نسبت ابعاد  $W/L = 1.12$  برای داده‌های مشاهداتی (OB) و مدل‌سازی شده

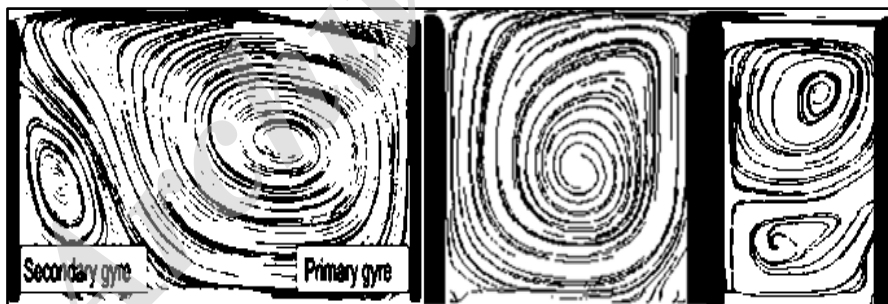




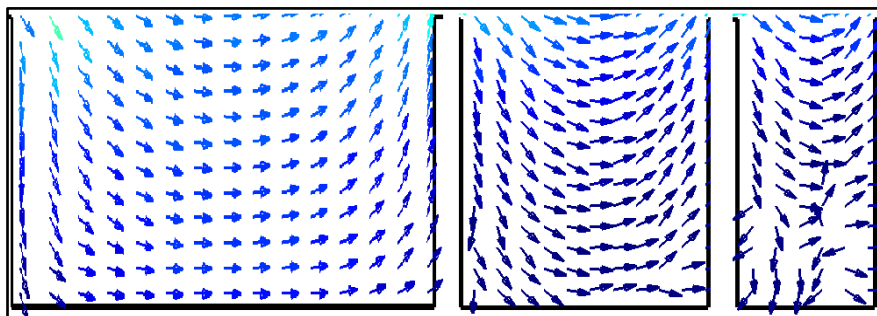
شکل ۷- مقادیر بدون بعد سرعت لحظه‌ای در جهت عرض کانال در مقطعی در مرز کانال اصلی و ناحیه مرده کناری با نسبت ابعاد  $W/L=2$  برای داده‌های مشاهداتی (OB) و مدل‌سازی شده

حفره‌ها با شرایط واقعی مطابقت ندارند و مدل نتوانسته است ناحیه اولیه و ثانویه ایجاد شده در آزمایش را به دلیل محدودیت مدل RANS1، با توجه به تک‌ناحیه‌ای بودن آن، شبیه‌سازی کند. در مجموع، بهترین شبیه‌سازی در مدل LES دیده می‌شود (شکل ۸ و ۱۱).

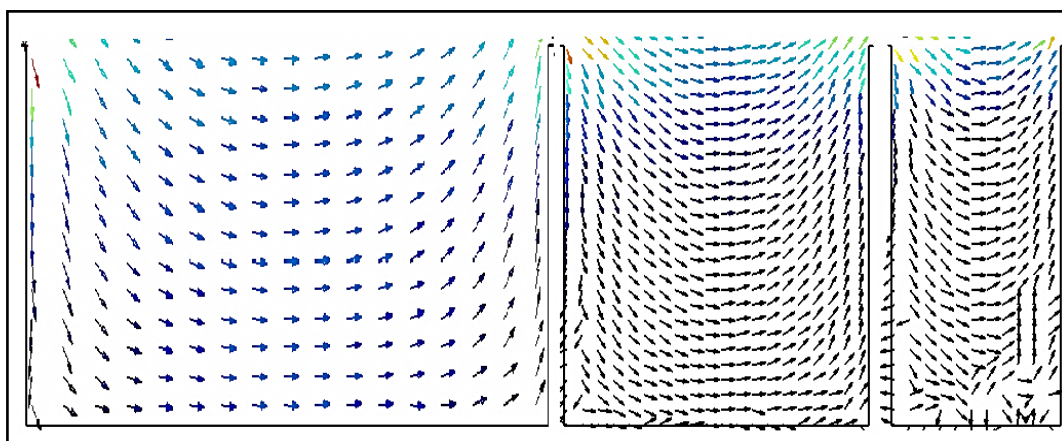
شکل‌های ۸ تا ۱۱ الگوی جریان اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از مدل‌های RANS1، RANS2 و LES را برای سه ناحیه گفته شده، به نمایندگی از کل نواحی، نشان می‌دهند. مقایسه الگوهای جریان برای مدل RANS1 (شکل ۸ و ۹) نشان می‌دهد که گردابه‌های ایجاد شده در



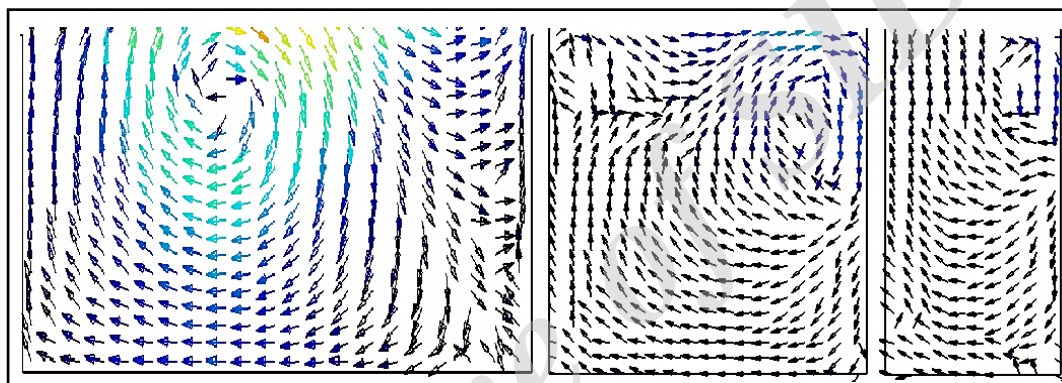
شکل ۸- الگوی جریان اندازه‌گیری شده در داخل ناحیه مرده (Weitbrecht et al., 2008)



شکل ۹- الگوی جریان مدل‌سازی شده در داخل سه ناحیه مرده مورد مطالعه با استفاده از مدل RANS1



شکل ۱۰- الگوی جریان مدل‌سازی شده در داخل سه ناحیهٔ مردهٔ مورد مطالعه با استفاده از مدل RANS2



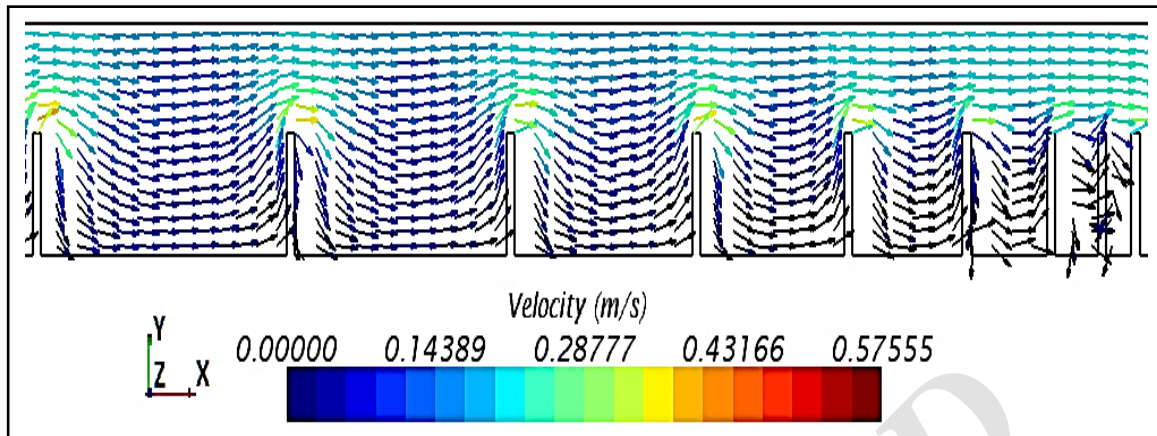
شکل ۱۱- الگوی جریان مدل‌سازی شده در داخل سه ناحیهٔ مردهٔ مورد مطالعه با استفاده از مدل LES

با توسعه بیشتر جریان و لایه‌های اختلاطی، نواحی مرده بالادست تأثیر بیشتری بر جریان می‌گذارند و الگوی جریان به شرایط واقعی جریان در مجاری روباز در حضور نواحی مرده کناری نزدیک‌تر می‌شود (شکل‌های ۱۲ الی ۱۴).

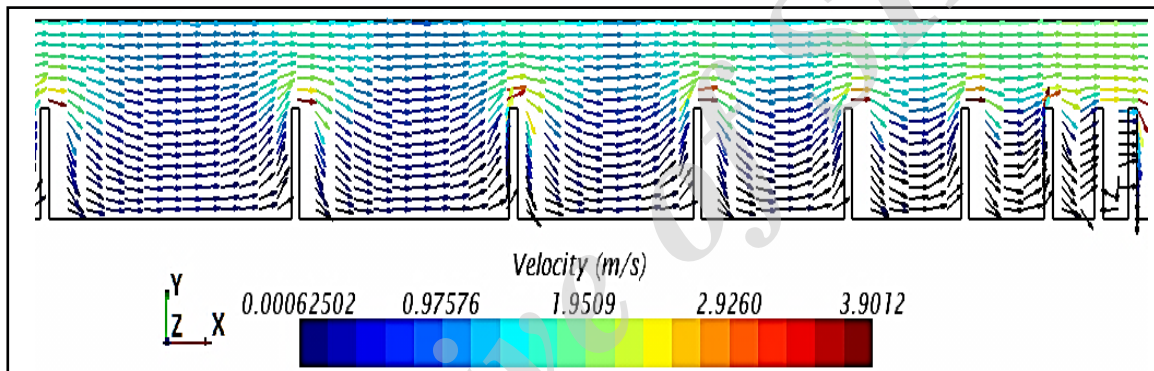
در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، نوار سرعت آورده شده در قسمت پایین نشان‌دهندهٔ متوسط سرعت لحظه‌ای در نقاط مختلف کانال است. نواحی آبی تیره‌رنگ نشان‌دهندهٔ سرعت‌های پایین و نواحی قرمز نشان‌دهندهٔ سرعت‌های بالاتر است.

وجود نواحی مرده در رودخانه‌ها نشان می‌دهد که تلاطم جریان در سرتاسر رودخانه همگن نیست. تنش برشی اغتشاش‌ها باعث ایجاد و توسعهٔ لایهٔ اختلاطی می‌شود. لایهٔ اختلاطی فاصله‌ای است در امتداد دهانهٔ حفره که در آن اختلاط کامل جریان در کانال اصلی و جریان داخل حفره رخ می‌دهد. شکل‌های ۱۲ تا ۱۴، الگوی جریان به دست آمده برای تمام حفره‌ها در پژوهش حاضر را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که هرچه بیشتر به سمت پایین دست جریان پیش رویم (از نواحی با ابعاد بزرگ‌تر به سمت نواحی با ابعاد کوچکتر برویم)،

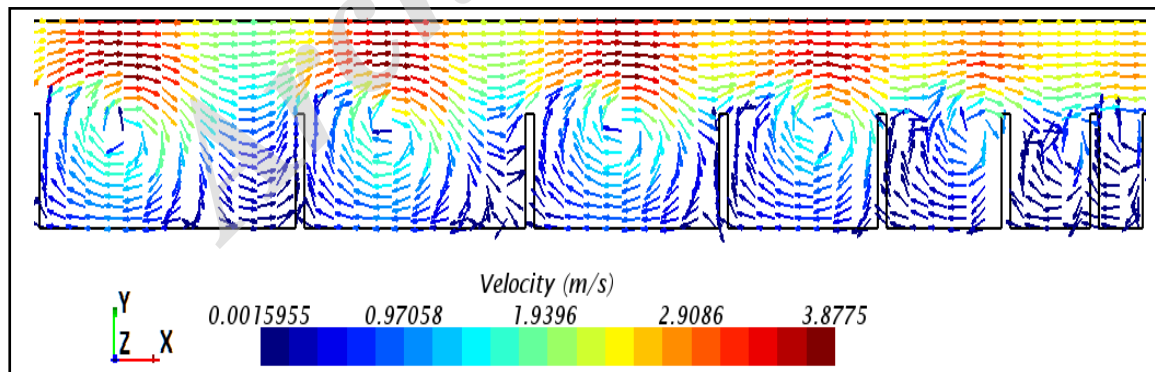
شبیه‌سازی عددی جریان در نواحی مرده مستطیلی...



شکل ۱۲- توزیع سرعت برای تمام نواحی در مدل RANS1



شکل ۱۳- توزیع سرعت برای تمام نواحی در مدل RANS2



شکل ۱۴- توزیع سرعت برای تمام نواحی در مدل LES

مرده رخ می‌دهد (نواحی روشن در شکل ۱۴) و سرعت متوسط جریان با ورود به نواحی مرده کمتر می‌شود (شکل‌های ۱۲ تا ۱۴). علت این مسئله می‌تواند آن باشد که ناحیه مرده کناری با جلوآمدگی (به‌صورت آب‌شکن)

بررسی نتایج حاصل نشان می‌دهد که الگوی جریان به‌دست آمده با استفاده از مدل LES بیشترین نزدیکی را با نتایج آزمایشگاهی دارد (شکل‌های ۱۱ و ۱۴)؛ همچنین، بیشینه سرعت جریان در مرز بین کانال اصلی و ناحیه

در مقایسه با داده واقعی و داده حاصل از LES پایین است (شکل‌های ۵ تا ۷)، گردابه‌ها به خوبی شبیه‌سازی نشده‌اند (شکل ۱۰ و ۱۳).

به‌طور کلی، نتایج بررسی‌ها 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 این‌گونه گفت که بعضی از گردابه‌های بزرگ مقیاس ایجاد شده در داخل لایه اختلاطی تحت تأثیر همین دیواره‌ها ایجاد شده‌اند و بهترین معیار برای سنجش آن، مقایسه نسبت  $U_y/U^*$  در مرز بین کانال اصلی و ناحیه مرده است (شکل‌های ۵ تا ۷).

### نتیجه‌گیری

اندازه سرعت جریان در قسمت ورودی با اندازه سرعت جریان در داخل ناحیه مرده تفاوت دارد. این تفاوت در سرعت جریان باعث ایجاد ناحیه‌ای گردابه‌ای با هسته‌ای مشخص در مرکز ناحیه می‌شود که با ناحیه‌ای با مومنتوم بالاتر محصور شده است. این شرایط با شرایط حاکم بر مدل‌های دو معادله‌ای تناسب دارد. بنابراین مدل RANS1، به دلیل تک‌ناحیه‌ای بودن، کارایی لازم را برای شبیه‌سازی جریان گردابه‌ای ایجاد شده در نواحی مرده ندارد. همچنین، مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های دوناحیه‌ای نشان می‌دهد که مدل RANS2 کارایی بیشتری نسبت به مدل LES دارد زیرا مدل LES ساختارهای آشفتگی جریان را با الگوریتم‌های شبکه‌بندی ایجاد و محاسبه می‌کند و به همین دلیل نیز بیشینه سرعت به دست آمده با استفاده از آن به مقدار واقعی نزدیک‌تر است.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که اندازه سرعت جریان در قسمت ورودی با اندازه سرعت جریان در داخل ناحیه مرده تفاوت دارد. این تفاوت در سرعت جریان باعث

ایجاد شده است، ایجاد مانع در مسیر جریان باعث افزایش سرعت و شتاب جریان می‌شود. در نتیجه، این شتاب گرفتن جریان باعث جدایی بیشتر جریان و افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی گوشه‌های بالادست ناحیه مرده و در لایه اختلاطی شده است.

در چنین مواردی، ناحیه کم‌سرعت به صورت ناحیه‌ای چرخشی ظاهر می‌شود که علت آن جدایی جریان ناشی از گرادیان طولی فشار است؛ این نتایج با نتایج حاصل از پژوهش‌های جیرکا (Jirka, 2001) و همچنین با نتایج بررسی‌های کوین و همکاران (Kevin et al., 2014) همخوانی دارد که اعلام کردند نوع جریان در نواحی مرده از نوع جریان‌های ثانویه و بازچرخشی<sup>۱</sup> است. جریان زیرسطحی در آنها صفر و تنها تبادل جریان با کانال اصلی است.

مقایسه نتایج به دست آمده از شکل ۱۴ با نتایج حاصل از 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. این نتیجه‌گیری با نتایج بررسی‌های جکسون و همکاران (Jackson et al., 2012) مطابقت دارد که می‌گویند در نواحی مرده کناری، مکانیسم شکل‌گیری لایه‌های اختلاطی، متفاوت با مکانیسم شکل‌گیری لایه‌های اختلاطی کلاسیک و معیار سنجش، سرعت در راستای عرضی ( $U_y$ ) است. 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 همین دلیل است که در پژوهش حاضر اگرچه سرعت بیشینه به دست آمده در کانال اصلی برای مدل RANS2 به سرعت بیشینه به دست آمده در کانال اصلی برای مدل LES نزدیک است (شکل‌های ۱۳ و ۱۴)، اما چون بیشینه  $U_y$  محاسبه شده با RANS2 در مرز ناحیه مرده و کانال اصلی

ایجاد ناحیه‌ای گردابه‌ای با هسته‌ای مشخص در مرکز ناحیه می‌شود که با ناحیه‌ای با مومنتوم بالاتر محصور شده است. این شرایط با شرایط حاکم بر مدل‌های دو معادله‌ای تناسب دارد. بنابراین مدل RANS1، به دلیل تک‌ناحیه‌ای بودن، کارایی لازم را برای شبیه‌سازی جریان گردابه‌ای ایجاد شده در نواحی مرده ندارد. همچنین، مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های دوناحیه‌ای نشان می‌دهد که مدل RANS2 کارایی بیشتری نسبت به مدل LES دارد زیرا مدل LES ساختارهای آشفتگی جریان را با الگوریتم‌های شبکه‌بندی ایجاد و محاسبه می‌کند و به همین دلیل نیز بیشینه سرعت به دست آمده با استفاده از آن به مقدار واقعی نزدیک‌تر است.

## مراجع

- Anon. 2010. Benchmarking CD-adapco's STAR-CCM+ in a production design environment. ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers.
- 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. Environ. Fluid Mech. 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.
- Hinterberger, C., Frohlich, J. and Rodi, W. 2007. Three-dimensional and depth averaged large-eddy simulations of some shallow water flows. J. Hydraul. Eng. 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 Resour. Res. 48(10): 105-115.
- Jirka, G. H. 2001. Large scale flow structures and mixing processes in shallow flows. J. Hydraul. Res. 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. J. Hydraul. Eng. 140, 1-14.
- McCoy, A., Constantinescu, G. and Weber, L. J. 2008. Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel with a series of groynes. J. Hydraul. Eng. 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. Atmos. Environ. 43(16): 2518-2531.
- Valentine, E. and Wood, I. 1979. Dispersion in rough rectangular channels. Hydraul. Div. 105(12): 1537-1553.
- Van Balen, W., Uijttewaalt, W. S. J. and Blanckaert, K. 2009. Large-eddy simulation of a mildly curved open-channel flow. J. Fluid Mech. 630(1): 413-442.
- Weitbrecht, V., Socolofsky, S. and Jirka, G. 2008. Experiments on mass exchange between groin fields and main stream in rivers. J. Hydraul. Eng. 2, 173-183.

## **Numerical Simulation of Flow in Rectangular Dead Zones in Irrigation Channel Using STAR-CCM+ Model**

**H. Banejad, H. Nozari and F. Ghaemizadeh\***

\* Corresponding Author: Ph. D. Student, Water Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: ghaemizadeh\_farzaneh@yahoo.com

Received: 20 October 2016, Accepted: 8 March 2017

Lateral dead zone Studies are very important because the flow turbulence specifications in this situation are not fully known yet. Also in a series of lateral dead zones, their placement, number and size have different effect on the flow pattern. In this study, an attempt was made to determine the ability of STAR-CCM + in three-dimensional simulating of flow in series of rectangular lateral dead zone. For this purpose, the results of an experimental model was used. STAR-CCM+ was calibrated to determine the most suitable turbulence models and in order to validate, results, the data obtained from transverse fluctuations along the width of channel was used. The results showed that accelerating the flow in the main channel more flow separation and increase the flow velocity gradient near the upstream corner of dead zone. With the entry into dead zone, average flow velocity reduces and low-velocity zone appears as a circular area. Analyzing the flow pattern showed that in simulation of turbulence distribution RANS 2-end order model has a better efficiency in comparison with RANS 1-end order model. Finally the LES model showed the highest efficiency in the flow simulation.

**Keywords:** Flow Pattern, Turbulence Intensity, Turbulence Model, Two-Region Model