

## مدل سازی عددی جریان عبوری از دریچه های کشویی در تمام دامنه استغراق

محمدعلی قوبدل<sup>۱</sup>، صلاح کوچک زاده<sup>۲\*</sup>، محمد بی جن خان<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۲. استاد، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

۳. استادیار، گروه مهندسی آب دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۴/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۵/۳)

### چکیده:

در این تحقیق با به کارگیری یک مدل عددی دوبعدی، هیدرولیک جریان عبوری از دریچه های کشویی در شرایط مستغرق شناسایی شد و نتایج حاصل با روابط موجود و داده های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. داده های آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق گستره مناسبی از جریان با استغراق پایین تا استغراق کامل را پوشش می دهند. مدل سازی عددی با استفاده از جعبه ابزار OpenFOAM صورت گرفت. برای اعمال اثرات آشفتگی، مدل  $k-\epsilon$  استاندارد به کار گرفته شد. همچنین، شناسایی سطح آزاد جریان به کمک روش حجم سیال صورت گرفت. نتایج حاصل به صورت پروفیل سطح آب، الگوی توزیع سرعت در عمق، وضعیت جریان رو به جلو و جریان برگشتی در ناحیه مستغرق بعد از دریچه، استخراج و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. پروفیل های سطح آب و توزیع سرعت با درستی مناسبی شبیه سازی شد. در بررسی پروفیل های سرعت بدون بعد شده، ملاحظه شد که در نزدیک سطح جریان، به دلیل اثر جریان های زیرسطحی که در مدل دوبعدی لحاظ نشده است، سرعت محاسبه شده از مدل بیشتر از سرعت اندازه گیری شده است. اختلاف نتایج حاصل از مدل با داده های آزمایشگاهی روی پارامترهای عمق جریان روبه جلو و عمق پایاب، نشان دهنده تاثیر نسبت استغراق روی این مولفه های جریان است. در ناحیه جریان توسعه یافته پایاب دریچه مستغرق، اختلاف بین نتایج مدل دوبعدی با اندازه گیری های آزمایشگاهی کاهش یافت که می توان آن را به کاهش اثرات آشفتگی و نزدیک شدن به جریان دو بعدی در نقاط دورتر در پایین دست دریچه نسبت داد. پیشنهادهایی در خصوص نحوه تعیین شرایط مرزی در بسته OpenFOAM مطرح گردید.

واژه های کلیدی: دریچه کشویی، مستغرق، مدل عددی، OpenFOAM، مدل آشفتگی

### مقدمه

پیچیدگی زیاد هیدرولیک جریان، آشکارتر است. بدیهی است هرگونه تغییر هندسی در دریچه ها (مانند تغییر زاویه استقرار آنها) می تواند مسئله را پیچیده تر هم کند. از این رو، هرچند تحقیقات انجام شده پیشین نتایج بسیار با ارزشی ارائه نموده اند، ضرورت تلاش بیشتر برای شناخت جریان و تدقیق نتایج همچنان پابرجا است. از این رو مطالعات مرتبط، کماکان به صورت جدی در حال تکمیل هستند. با عنایت به هزینه های آزمایشگاهی برای دستیابی به اطلاعات مورد نیاز، استفاده از مدل های رایانه ای قابل اعتماد دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> روش مکملی برای مطالعات آزمایشگاهی و میدانی تلقی می شود که با عنایت به توانمندتر شدن سخت افزارهای رایانه ای، با اقبال عمومی تری روبرو شده اند.

در صورت شکل گیری جهش آزاد، عمق مزدوج ( $y_2$ ) از معادله (۱) محاسبه می شود (French (1985):

با توجه به گستردگی استفاده از دریچه های کشویی در شبکه های آبیاری و سهولت استفاده از آن و اعتماد و تمایل کشاورزان به آن، آگاهی از وضعیت جریان در دریچه های کشویی در حالت آزاد و مستغرق، می تواند در تولید روابط قابل اعتماد دبی-ارتفاع جریان، نقش بسیار جدی داشته باشد. چنین روابطی می تواند کمک شایانی به تحویل مطلوب حجمی آب بدون تحمیل هزینه های گزاف به کارگیری تجهیزات دیگر باشد. اما فرضیات ساده کننده ای مانند صرف نظر کردن از افت های انرژی و اعمال تقریب هایی در ضریب فشردگی دریچه، که در تولید روابط یاد شده اعمال می شوند، باعث می گردد نتایج این روابط، با آنچه در میدان مشاهده می شود قدری فاصله داشته باشد. این نقیصه، به ویژه در حالت وقوع جریان مستغرق پایین دست، به دلیل

\* نویسنده مسئول: skzadeh@ut.ac.ir

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left( \sqrt{8F_1^2 + 1} - 1 \right) \quad (\text{رابطه 1})$$

در رابطه اخیر  $y_1$  عمق اولیه در جهش آزاد است. با فرض ضریب انقباض تئوریک دریچه لبه تیز معادل  $C_C = 0.61$  عمق اولیه جهش آزاد به صورت  $y_1 = w * C_C$  تعیین گردیده است. چنانچه عمق پایاب ( $y_{nw}$ ) بیشتر از عمق ثانویه جهش آزاد در پایین دست دریچه ( $y_2$ ) باشد جریان مستغرق شکل می گیرد. نسبت استغراق<sup>۱</sup> ( $SR$ ) از رابطه (۲) محاسبه می شود ((Long et al. (1991):

$$SR = \frac{(y_{nw} - y_2)}{y_2} \quad (\text{رابطه 2})$$

اثرات استغراق در مشخصات جریان دارای اهمیت است. همچنین الگوی جریان در اثر استغراق پیچیده تر می شود. این موضوع در برخی از تحقیقات، چه به صورت آزمایشگاهی و چه به صورت عددی، مورد توجه محققین قرار گرفته است. Long et al. (1991) از روش حجم کنترل جابه جاشده<sup>۲</sup>

برای شبیه سازی جهش مستغرق در دریچه کشویی استفاه نمودند. آنان وضعیت جریان را در سه حالت مختلف در آزمایشگاه اندازه گیری کردند و نتایج مدل عددی دو بعدی را با این اندازه گیری ها مورد مقایسه قرار دادند. محدوده عدد فرود جریان عبوری از زیر دریچه بین  $3/2$  تا  $8/2$  و نسبت استغراق بین  $0/24$  تا  $0/85$  بوده است. نتایج حاصل از این تحقیق، گویای آن بود که پروفیل سطح آب، میدان سرعت متوسط و تاحدودی نیز مشخصات آشفتگی جریان، به نحو قابل قبولی پیش بینی شده است. مدل آشفتگی مور استفاده در این تحقیق، مدل  $k-\epsilon$  استاندارد بوده است.

Ma et al. (2001) با استفاده از شبیه سازی دوبعدی مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  جهش هیدرولیکی مستغرق در دریچه ها را مورد بررسی قرار دادند. آنان پروفیل سطح آب را با به کارگیری روش حجم سیال<sup>۳</sup> (VOF) محاسبه و با داده های آزمایشگاهی Long et al. (1990) مقایسه نمودند. هرچند در شبیه سازی سطح آزاد جریان، نتایج مناسبی حاصل شد، ولی در پیش بینی سرعت ها و مولفه های آشفتگی خطاهایی دیده شد. این موضوع به طبیعت سه بعدی جریان در جهش هیدرولیکی مستغرق ارتباط داده شد.

Akoz et al. (2009) جریان آزاد در یک دریچه کشویی را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنان

معادلات ناویر-استوکس متوسط گیری شده رینولدز را با به کارگیری دو مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  به صورت دو بعدی تحلیل نمودند. شناسایی موقعیت سطح آزاد به کمک روش حجم سیال (VOF) انجام شد. آنان ضمن حساسیت سنجی و انتخاب مش بندی بهینه، نتیجه گیری کردند که مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  در شبیه سازی پروفیل سطح آب و توزیع سرعت، بهتر از مدل  $k-\omega$  عمل نمود. همچنین زمان محاسباتی مورد نیاز مدل  $k-\epsilon$  در حدود سه تا چهار برابر کمتر از آن برای مدل  $k-\omega$  بود.

Cassan and Belaud (2010) با مطالعه عددی و آزمایشگاهی جریان مستغرق در یک دریچه کشویی، اظهار داشتند که روابط دبی برای باز شدگی زیاد دریچه و استغراق بالا، به نحو مناسبی عمل نمی کنند. همچنین نتایج مدل RANS با داده های اندازه گیری آنان سازگار بود.

Cassan and Belaud (2011) جریان زیر یک دریچه کشویی را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنان نتیجه گرفتند که این جریان دوبعدی است. همچنین نشان دادند که در نسبت های استغراق بالا، با افزایش باز شدگی دریچه، ضریب انقباض افزایش می یابد و این موضوع با نتایج حاصل از به کارگیری روش بالانس انرژی-اندازه حرکت، مطابقت دارد.

Raiford and Khan (2013) دو مدل  $k-\epsilon$  و RNG را برای شناسایی ساختار آشفتگی در جهش مستغرق دریچه به کار بردند. این مطالعه برای سه حالت مختلف از عدد فرود ورودی و نسبت استغراق انجام شد. آنان نتیجه گرفتند که با به کارگیری مدل RNG پروفیل طولی سرعت و مقدار حداکثر آن در امتداد قائم، بهتر تخمین زده شد. برای اعداد فرود بالا و در ناحیه جریان چرخشی، هر دو مدل، ارتفاع سطح آب را بیش از مقدار واقعی برآورد نمودند. همچنین آنان نتیجه گرفتند که طبیعت جریان به ویژه در محدوده نزدیک به ورودی، سه بعدی است.

Javan and Eghbalzadeh (2013) با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  جریان در جهش هیدرولیکی مستغرق را به صورت دوبعدی شبیه سازی نمودند. با به کارگیری روش شبکه بندی متحرک لاگرانژی، موقعیت سطح آزاد را تعیین نمودند. روش شبکه بندی متحرک در شبیه سازی سطح آزاد خوب عمل نمود. این محققین اظهار داشتند برای اطلاع درست از میدان جریان لازم است مدل سازی به صورت سه بعدی انجام شود و تنها از این طریق می توان جریان در جهش هیدرولیکی مستغرق را به درستی شبیه سازی نمود.

1. Submergence ratio  
2. Offset control volume  
3. Volume of fluid

شبیه سازی نمودند. آنان از تکنیک شبیه سازی گردابه مجزا<sup>۱</sup> استفاده نمودند. مشابه شرایط اندازه گیری های انجام شده توسط Long *et al* (1990)، عدد فرود جریان فوق بحرانی عبوری از دریچه ۸/۲ و نسبت استغراق ۰/۲۴ بود. شبیه سازی سطح آزاد جریان به روش حجم سیال و تکنیک حد واسط با دقت بالا<sup>۲</sup> انجام شد. با بررسی تجزیه متعامد سره<sup>۳</sup> دریافتند که ساختارهای گردابه ای با مقیاس کوچک در ناحیه جریان توسعه یافته جهش هیدرولیکی مستغرق، عامل اصلی در اتلاف انرژی این جریان هستند. همچنین اذعان نمودند که لایه برشی در امتداد جریان توسعه می یابد و در ادامه تحت تاثیر جریان چرخشی<sup>۴</sup> شکسته می شود. با تحلیل ساختار جریان در جهش هیدرولیکی مستغرق، دریافتند که لوله های گردابه ای بزرگ<sup>۵</sup> از سمت دریچه شکل می گیرند. این لوله های گردابه ای تحت تاثیر بستر و جریان چرخشی در ناحیه جریان توسعه یافته به گردابه های کوچک تر و کرم مانندی شکسته می شوند. در ناحیه جریان توسعه یافته، ساختارهای جریان با مقیاس کوچک عامل حاکم بر استهلاك انرژی شناخته شدند. جدول (۱)، خلاصه ای از خصوصیات تحقیقات مشابه و تحقیق حاضر را نشان می دهد.

1. Detached eddy simulation (DES)
2. High-resolution interface capturing
3. Proper orthogonal decomposition
4. Roller
5. Large vortex tube

Gumus *et al.* (2015) نیز مدل دوبعدی جریان مستغرق خروجی از دریچه کشویی را با به کارگیری مدل های SKE، RNG، RKE، SST و RSM در روش VOF مورد آزمون قرار داده اند. نتایج حاصل از این محاسبات در قالب پروفیل های سطح آب، پروفیل های توزیع سرعت و فشار و همچنین طول ناحیه جریان گردابه ای روی جهش مستغرق با مقادیر اندازه گیری شده مورد مقایسه قرار دادند. آنان نتیجه گرفتند که با به کارگیری مدل RSM مولفه های افقی سرعت انطباق بهتری با داده های اندازه گیری نشان داده است. با استفاده از این مدل منتخب، پروفیل سطح آب نیز شبیه سازی شد و انطباق این مشخصه نیز مورد تایید قرار گرفت.

Ghavidel *et al.* (2016) نشان دادند که فرض دوبعدی بودن جریان در ناحیه برگشتی روی جت مستغرق نمی تواند همیشه به واقعیت نزدیک باشد. آنان با به کارگیری داده های آزمایشگاهی در یک کانال عریض، توانستند نتایج مناسبی از اجرای مدل دوبعدی حاصل نمایند و خطای نسبی مطلق در پروفیل های سرعت حاصل از مدل دوبعدی آنان کمتر از ۲۵ درصد بود. براین اساس نتیجه گرفتند که استفاده از داده های اندازه گیری در کانال کم عرضی که سایر محققین برای مقایسه نتایج مدل دوبعدی به کار گرفته اند، باعث ایجاد خطای کاملاً بزرگ تری می شود.

Jesudhas *et al.* (2017) جریان جهش هیدرولیکی مستغرق پایین دست یک دریچه کشویی را به صورت سه بعدی

جدول ۱. خلاصه ای از مشخصات تحقیقات مشابه و تحقیق حاضر

SR	q (l/s/m)	مدل آشفتگی	نوع جهش	روش بررسی	محقق
۰/۲۴~۰/۸۵	۳۹/۵~۶۸/۰	SKE	S	Exp. & Num.	Long <i>et al</i> (1991).
۰/۲۴~۰/۸۵	۳۹/۵~۶۸/۰	SKE	S	Num. (2D)	Ma <i>et al.</i> (2001)
-	۳۰/۶~۹۳/۴	RNG	F	Num. (2D)	Kim (2007)
-	۱۰/۵	SKE, $k - \omega$	F	Exp. & Num.	Akoz <i>et al.</i> (2009)
۰/۷~۰/۹	-	SKE, RNG, $k - \omega$	S	Exp. & Num.	Cassn and Belaud (2010)
۰/۵~۰/۹۴	۶/۷~۴۱/۳	RNG, SKE, RSM	S & F	Exp. & Num.	Cassn and Belaud (2011)
۰/۲۴~۰/۸۵	۳۹/۵~۶۸/۰	SKE	S	Num. (2D)	Javan and Eghbalzadeh (2013)
۰/۲۴~۰/۸۵	۳۹/۵~۶۸/۰	RNG, SKE	S	Num. (2D)	Raiford and Khan (2013)
۰/۵۷~۱/۵۲	۱۸/۲~۳۰/۲	SKE, RNG, RKE, SST, RSM	S	Exp. & Num.	Gumus <i>et al.</i> (2015)
۰/۲۴~	-	DES	S	Num. (3D)	Jesudhas <i>et al.</i> (2016)
۰/۵۷~۱/۵۲	۱۸/۲~۳۰/۲	SKE	S	Num. (2D)	Ghavidel <i>et al.</i> (2016)
۰/۲۵~۷/۴۴	۱۴/۱~۷۷/۲	SKE	S	Num. (2D)	تحقیق حاضر

SKE: Standard  $k - \epsilon$ , RNG: Renormalization Group  $k - \epsilon$ , RKE: Realizable  $k - \epsilon$ , SST: Shear Stress Transport, RSM: Reynolds Stress Model

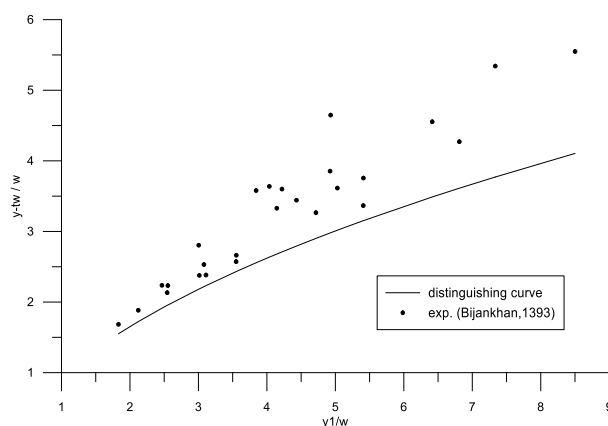
براساس تحقیق مذکور، حداکثر عمق پایایی که منجر به استغراق جریان خروجی از دریچه نمی شود با  $y_{TW_{max}}$  اسم گذاری می شود و از رابطه زیر محاسبه قابل محاسبه است:

به منظور شناسایی حدود استغراق در اندازه گیری های انجام شده توسط Bijankhan (2014)، از تعریفی که (2001) Yen *et al.* برای آستانه استغراق ارائه داده اند، استفاده گردید.

$$\frac{y_{w_{max}}}{wC_C} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{16}{\frac{wC_C}{y_1} \left( 1 + \frac{wC_C}{y_1} \right)}} - 1 \right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

بنابراین، چنانچه عمق پایاب  $y_w$  از مقدار حداکثری که از این معادله حاصل می‌شود، بزرگ‌تر باشد، جریان خروجی مستغرق خواهد بود. در این رابطه  $w$  میزان بازشدگی دریچه و  $C_C$  ضریب انقباض دریچه است که برای جریان آزاد به صورت نظری، معادل  $0/61$  می‌باشد. عمق بالادست دریچه نیز با  $y_1$  نشان داده شده است.

براساس داده‌های اندازه‌گیری بی‌جن‌خان (۱۳۹۳) منحنی شکل (۱) وضعیت استغراق آزمایشات را براساس رابطه فوق نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که کلیه نقاط اندازه‌گیری‌ها در بالای منحنی آستانه استغراق قرار دارند. دامنه این نقاط بسیار وسیع بوده و ملاحظه می‌شود که محدوده استغراق اندازه‌گیری‌شده در این آزمایش‌ها، کاملاً وسیع است. همچنین اختلاف عمق بالادست و پایین‌دست دریچه در این اندازه‌گیری‌های از  $0/93$  تا  $13/73$  سانتیمتر گزارش شده است. بر این اساس می‌توان ادعان داشت که محدوده استغراق این اندازه‌گیری‌ها کاملاً وسیع بوده و در تحقیقات گزارش‌شده در منابع، چنین دامنه‌ای از استغراق ملاحظه نمی‌شود.



شکل ۱. منحنی آستانه استغراق و محدوده استغراق در آزمایشات bijankhan (2014)

همان‌گونه که دیده می‌شود، مطالعات عددی انجام‌شده برای بررسی جهش مستغرق در دریچه‌های کشویی اندک بوده و دامنه محدودی از نسبت استغراق را پوشش داده‌اند. لذا تحقیق حاضر که محدوده وسیعی از دامنه استغراق جریان را در بر می‌گیرد، این کمبود را پوشش داده است. همچنین از آنجایی که ضریب انقباض دریچه و سایر مشخصات جریان در مقادیر مختلف نسبت استغراق، تغییر می‌کند (Cassan and (2011) Belaud) لازم است توجه بیشتری به این موضوع معطوف شود. در تحقیق حاضر، ضمن بررسی میزان درستی شبیه‌سازی

جریان مستغرق خروجی از دریچه با استفاده از جعبه‌ابزار دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> OpenFOAM، تلاش شده است خطای ناشی از به‌کارگیری یک مدل دوبعدی واقعی را در تحلیل این وضعیت شناسایی نمود. همچنین با به‌کارگیری محدوده وسیعی از داده‌های اندازه‌گیری انجام‌شده توسط بی‌جن‌خان (۱۳۹۳)، برای جریان با نسبت‌های استغراق مختلف، تاثیر این موضوع را شناسایی کرد و اثرات آن را در پارامترهای جریان بررسی نمود.

نتایج حاصل، با بررسی مولفه‌های اصلی جریان شامل پروفیل سرعت و توزیع سرعت در عمق، مورد تایید قرار گرفت. برخی از مولفه‌های جریان مستغرق نیز مورد مقایسه قرار گرفت. مقدار سرعت حداکثر و عمق سرعت نصف آن، عمق جریان رو به جلو و عمق پایاب، از جمله این مولفه‌ها بودند. اثرات میزان استغراق روی این پارامترها نیز مورد سنجش قرار گرفت. همچنین در داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده، دو حالت از جریان توسط مدل شبیه‌سازی شد. در حالت اول میزان بازشدگی دریچه کمتر از عمق بحرانی جریان است و جت خروجی فوق‌بحرانی می‌باشد. در حالت دوم نیز بازشدگی دریچه از عمق بحرانی بزرگ‌تر بوده و نتیجتاً جریان خروجی از دریچه فوق‌بحرانی نیست. نتایج در شرایط اخیر خطای بیشتری نشان داد و نشان می‌دهد که این حالت از جریان نیازمند بررسی بیشتری است. اثرات ورود هوا و کاهش شدت جریان برگشتی روی جت مستغرق در نواحی دورتر از دریچه در پایین‌دست، منجر به نتایج درست‌تری در مدل عددی دوبعدی، گردید. ماهیت سه‌بعدی جریان که در برخی از تحقیقات مشابه نیز به تایید رسیده است، می‌تواند باعث بروز خطا در پیش‌بینی برخی از متغیرهای مسئله که از دیواره‌ها تاثیر می‌گیرند، گردد. شکل‌گیری جریان‌های عرضی در سطح و گردابه‌های قائم نسبتاً بزرگ در مرکز جریان، از جمله این موارد است.

## مواد و روش‌ها

### آزمایشات و اندازه‌گیری‌های انجام‌شده

برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی از اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط بی‌جن‌خان (۱۳۹۳) استفاده شده است. آزمایش‌های انجام‌شده توسط این محقق در یک کانال مستطیلی به عرض  $1/179$  متر، ارتفاع  $0/45$  متر و طول  $7/0$  متر انجام شده است. در فاصله  $2/0$  متر از ورودی، یک دریچه لبه‌تیز با ضخامت ۲

1. CFD toolbox

در این رابطه، مقدار مولفه های سرعت به صورت متوسط زمانی با  $\bar{u}_i$  نشان داده شده است. به این شکل از معادلات حاکم، معادلات ناویر-استوکس متوسط رینولدز<sup>۲</sup> گفته می شود. به این ترتیب، بخشی از مشخصات جریان در نوسانات لحظه ای از دست می رود. برای اعمال نوسانات آشفته در مقادیر متوسط گیری شده زمانی، تنش های لزج را که تحت نام تنش های رینولدز شناخته می شوند، می توان به صورت زیر نوشت (2007) (Versteeg and Malalasekera):

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (\text{رابطه ۶})$$

بر اساس این روش که توسط Boussinesq (1887) پیشنهاد شده است، تنش های رینولدز با نرخ متوسط تغییر شکل مرتبط می شوند. در این رابطه  $u'_i$  نوسان مولفه  $i$  بردار سرعت است. پارامتر  $\mu_t$  لزجت گردابه ای یا آشفته بوده و  $\delta_{ij}$  دلتا کرونیگر می باشد.  $k$  که به نام انرژی جنبشی آشفته در واحد جرم سیال بوده و اساس مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد می باشد، به صورت زیر تعیین می شود (2007) Versteeg and (Malalasekera):

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (\text{رابطه ۷})$$

سطح آشفته گی و تنش های آشفته، از نقطه ای به نقطه دیگر تغییر می کند و تخمین این تغییرات به طرق مختلف، اساس تمایز مدل های مختلف آشفته گی است. در مدل  $k-\varepsilon$  توصیف آشفته گی به نحوی است که اثرات انتقال خصوصیات آشفته گی به واسطه جابجایی<sup>۳</sup> و پخشودگی<sup>۴</sup> از طریق ایجاد و استهلاك آشفته گی صورت می پذیرد. به این ترتیب لازم است دو معادله دیفرانسیل انتقال حل شوند که یکی از آنها برای تخمین مقدار انرژی جنبشی  $k$  بوده و دیگری برای برآورد نرخ استهلاك انرژی جنبشی آشفته که با  $\varepsilon$  معرفی شده است، می باشد.

انتخاب مدل آشفته گی  $k-\varepsilon$  در این تحقیق به دلایل متعددی بوده است که می توان به مواردی نظیر رواج و سابقه زیاد و وجود گزارش های مبتنی بر نتایج قابل قبول در به کارگیری آن برای تحلیل مسائل مشابه (2001) Ma *et al.* و (2009) Akoz *et al.* و (2013) Javan and Eghbalzadeh، توانمندی در حل مسائل متنوع و همچنین تامین درستی

میلیمتر در عرض کانال نصب شده است. در انتهای کانال یک سریز لبه تیز به ضخامت ۲ میلیمتر قرار داده شده است. با تغییر ارتفاع این سرریز، عمق پایاب تنظیم و شرایط وقوع جریان آزاد یا مستغرق تامین می شود. مولفه های سرعت توسط سرعت سنج آکوستیک<sup>۱</sup> اندازه گیری شده است.

اندازه گیری ها برای دو بازشدگی دریچه شامل ۴/۶۵ و ۶/۸۳ سانتیمتر صورت گرفته است. در بازشدگی ۴/۶۵ سانتیمتر، دبی جریان از ۱۲ لیتر بر ثانیه تا ۶۱ لیتر بر ثانیه و برای بازشدگی ۶/۸۳ سانتیمتر، دبی در محدوده ۳۰ لیتر بر ثانیه تا ۹۱ لیتر بر ثانیه بوده است. عمق پایاب نیز مقادیر مختلفی داشته است. همچنین در برخی از دبی های مورد بررسی، جریان خروجی از دریچه در هر دو حالت فوق بحرانی یا زیر بحرانی بوده است. در هر صورت، جریان پایین دست مستغرق است. جدول (۲) این اطلاعات را نشان می دهد.

بر این اساس، درجه استغراق جریان در آزمایشات انجام شده بین ۰/۲۵ تا ۷/۴۷ بوده است. از مقایسه ارقام این جدول با شرایط سایر تحقیقات مشابه در جدول (۱)، ملاحظه می شود که محدوده استغراق در تحقیق حاضر بسیار گسترده تر از آن چیزی است که تاکنون گزارش شده است. بنابراین می توان نتایج حاصل از مطالعه حاضر را به عنوان یک بررسی جامع مبتنی بر اثرات استغراق روی وضعیت جریان مستغرق خروجی از یک دریچه کشویی قلمداد نمود. همین شرایط در شبیه سازی جریان با مدل عددی نیز اعمال گردیده است. به منظور ارجاع نتایج، به هریک از شرایط اندازه گیری ها، از شماره آزمایش به شرحی که در این جدول نشان داده شده است، استفاده خواهد شد.

#### مدل ریاضی مسئله

معادلات حاکم بر جریان سیال نیوتنی لزج به نام معادلات ناویر-استوکس شناخته می شوند. شکل تانسوری این معادلات برای سیال تراکم ناپذیر و جریان سه بعدی، به صورت زیر می باشد (2007) Versteeg and Malalasekera):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (\text{رابطه ۵})$$

در این معادلات  $\rho$  چگالی سیال،  $\mu$  لزجت دینامیک سیال،  $u$  مولفه های بردار سرعت،  $p$  فشار و  $\tau$  تنش های لزج می باشند.

2. Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)  
3. convection  
4. diffusion

1. Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)

قابل قبول و نیازهای محاسباتی قابل تامین در این مدل اشاره نمود. البته لازم است به این نکته مهم نیز اشاره نمود که مدل مذکور با فیزیک مسئله نیز انطباق مناسبی دارد. چرا که بنا بر توصیه مراجع (Versteeg and Malalasekera, 2007)

فلاک انرژی جنبشی متعادل باشد، به جواب‌های مناسبی منجر می‌گردد. (FLUENT 6.3, User Guide (2006) در شرایطی که جریان فاقد انحنای شدید و یا گرادیان فشار زیاد بوده و نرخ ایجاد و استهلاک انرژی جنبشی متعادل باشد، به جواب‌های مناسبی منجر می‌گردد.

جدول ۲. وضعیت جریان‌های مورد بررسی در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

شماره آزمایش	دبی (l/s)	بازشدگی دریچه (cm)	نسبت استغراق
Set-01 ~ Set-04	۶۱/۰	۴/۶۵	۰/۵۸~۱/۰۵
Set-05 ~ Set-07	۵۱/۱	۴/۶۵	۰/۴۷~۱/۰۵
Set-08 & Set-09	۲۱/۶	۴/۶۵	۳/۵۸~۷/۴۷
Set-10 ~ Set-12	۱۶/۳	۴/۶۵	۱/۱۰~۱/۹۸
Set-13 & Set-14	۳۰/۳	۴/۶۵	۰/۵۸~۱/۲۸
Set-15	۴۰/۳	۴/۶۵	۶/۸۷
Set-16	۴۰/۱	۴/۶۵	۰/۹۱
Set-17	۱۲/۰	۴/۶۵	۰/۵۷
Set-18	۸۰/۴	۶/۸۳	۱/۰۴
Set-19	۵۰/۵	۶/۸۳	۰/۴۳
Set-20	۶۳/۳۵	۶/۸۳	۱/۲۴
Set-21	۶۵/۶	۶/۸۳	۱/۹۳
Set-22	۷۱/۷	۶/۸۳	۰/۸۶
Set-23	۷۱/۰	۶/۸۳	۰/۶۹
Set-24	۴۰/۱۵	۶/۸۳	۱/۸۱
Set-25	۳۰/۰	۶/۸۳	۳/۰۷
Set-26	۸۱/۰	۶/۸۳	۰/۳۳
Set-27	۹۱/۰	۶/۸۳	۱/۱۸

(Versteeg and Malalasekera (2007):

(رابطه ۱۱)

$$C_{\mu} = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_{\varepsilon} = 1.30 \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92$$

اگر داده‌های درستی از این پارامترها در اختیار نباشد، کالیبراسیون مدل با هدف انطباق مناسب نتایج با اندازه‌گیری‌ها، ضروری است. با توجه به این که مقادیر جایگزینی برای این ثوابت در اختیار نیست و همچنین براساس پیشنهاد محققین در تحقیقات مشابه (Soares et al., 2005)، (Versteeg and Malalasekera, 2007) از مقادیر پیش‌فرض فوق استفاده شده است.

به منظور شناسایی سطح آزاد جریان‌های روباز از تکنیک حجم سیال با شمای عمومی منطبق بر شبکه‌بندی بی‌ساختار<sup>۱</sup> (Youngs (1984)) استفاده شده است. روش VOF در حل گر interFOAM در جعبه‌ابزار OpenFOAM موجود است که در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. تکنیک به کار

روابطی که در مدل  $k-\varepsilon$  مورد تحلیل قرار می‌گیرند

شامل سه معادله زیر است (Versteeg and Malalasekera (2007):

$$\mu_t = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

(رابطه ۹)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon$$

(رابطه ۱۰)

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \text{grad } \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

در این معادلات، پنج ثابت  $C_{\mu}$ ،  $\sigma_k$ ،  $\sigma_{\varepsilon}$ ،  $C_{1\varepsilon}$  و  $C_{2\varepsilon}$  وجود دارند که مقدار آن‌ها قابل انتخاب بوده و لازم است برای حل، تطبیق داده شوند. در مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد، در بسیاری از جریان‌های آشفته، مقادیر زیر مورد استفاده و تایید قرار گرفته است و در این تحقیق نیز از همان مقادیر استفاده شده است

1. unstructured grid

قابلیت‌های متعددی در حل مسایل مکانیک محیط پیوسته بوده و در تحلیل مسایل دینامیک محاسباتی سیالات نیز به‌خوبی به‌کارگرفته شده است (Hernandez (2011), Furbo (2010) and Schnoebelen, (2011) Shu *et al.*, (2016) Sun and Xiao). علاوه بر امکانات متعددی که در این جعبه‌ابزار تامین شده است، به دلیل باز بودن منبع آن، امکان تهیه کدهای اختصاصی نیز در آن وجود دارد. برای به‌کارگیری مناسب این بسته محاسباتی، در تحقیق حاضر مراحل زیر انجام شده است.

#### ۱- شبکه‌بندی میدان حل:

با تعریف میدان حل و هندسه مسئله مشتمل بر یک کانال مستطیلی که مشابه فلوم آزمایشگاهی تحقیقات بی‌جن‌خان (۱۳۹۳)، در عرض آن یک دریچه کشویی نصب شده و در انتها نیز یک سرریز لبه‌تیز قرار گرفته است، بلوک‌بندی بخش‌های مختلف انجام شده و سپس مش‌بندی و تعریف سلول‌های محاسباتی صورت گرفته است. برای سلول‌های محاسباتی از الگوی شش‌وجهی در دستگاه مختصات کارتزین استفاده شده است.

یکی از نکات مهم در بسته OpenFOAM امکان تعریف جریان دوبعدی به‌صورت کامل است. به این معنی که با باز گذاشتن مرزهای جامد در امتدادی که جریان قابل توجهی وجود نداشته و موردنظر نمی‌باشد (عرض کانال)، جریان به‌طور حقیقی دوبعدی می‌شود. این امکان موجب می‌شود بدون نیاز به افزایش عرض کانال برای بلاثر نمودن اثرات دیواره‌های جامد کانال، بتوان عرض را به حداقل ممکن رساند و از این طریق تعداد سلول‌های محاسباتی را به میزان قابل توجهی کاهش داد. برای اساس، برای ساخت مدل دوبعدی حاضر، عرض کانال ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. مرزهای قائم جلو و عقب کانال نیز از نوع خالی<sup>۶</sup> تعریف شده‌اند.

ذکر این نکته ضروری است که با توجه به عدم حل معادلات حاکم در امتدادی که فاقد جریان است، تعریف یک سلول محاسباتی در این راستا الزامی است. همچنین به‌منظور تامین نسبت ابعاد مناسب در شبکه‌بندی میدان حل، اندازه سلول مذکور تعیین می‌شود. انتخاب سلولی به‌اندازه ۲ میلی‌متر در راستای عرض کانال، با این استدلال بوده است.

تلاش شده است ضمن حساسیت‌سنجی حل، نسبت به بهینه نمودن ابعاد سلول‌ها اقدام شود. با انجام چندین آزمون مختلف و بررسی همگرایی حل، ابعاد سلول‌های محاسباتی بهینه شده‌اند. در این راستا، ابعاد هر سلول در امتداد  $x$  بین ۲ تا ۷

گرفته‌شده در این حل‌گر برای شناسایی سطح آب، روش کسر حجمی است.

#### مدل عددی مسئله

برای حل معادلات حاکم در جریان، از تکنیک‌های عددی مبتنی بر روش حجم محدود<sup>۱</sup> استفاده شد.

یکی از قابلیت‌های متمایز جعبه ابزار OpenFOAM امکان تخصیص متفاوت روش‌های انفصال و حل دستگاه معادلات برای متغیرهای مسئله می‌باشد.

براین اساس، مشخصات مدل عددی به‌کارگرفته‌شده در این تحقیق به شرح زیر است:

الف- روش شبکه‌بندی و انفصال معادلات، روش حجم‌کنترلی و متد حجم محدود است. برای انفصال معادلات اندازه‌حرکت و پیوستگی، مولفه‌های مختلف به روش‌های متفاوتی منفصل شده‌اند که به‌صورت زیر بوده است:

جملات مشتق زمانی: روش اولری

جملات گرادیان: روش خطی گوس

جملات دیورژانس: روش خطی گوس و گوس upwind

جملات لاپلاس: خطی گوس اصلاح‌شده

درونیایی: خطی

ب- شبکه‌بندی مورد استفاده به‌صورت شش‌وجهی و جابجاشده<sup>۲</sup> در مختصات متعامد کارتری می‌باشد.

نهایتاً برای حل دستگاه معادلات به‌دست‌آمده برای ماتریس ضرایب، از روش PCG برای ماتریس‌های متقارن فشار و عامل تصحیح فشار و روش PBiCG<sup>۳</sup> برای ماتریس نامتقارن سرعت، با خطای قابل‌پذیرش  $10^{-6}$  تا  $10^{-10}$  استفاده گردیده است. به‌منظور تامین همگرایی حل عددی، مقدار مجاز عدد کورانت<sup>۴</sup> معادل ۰/۸ در نظر گرفته شده است. تکنیک به‌کارگرفته برای حل معادلات کوپل‌شده با فشار، روش PISO است. برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان از روش حجم سیال با متد کسرحجمی<sup>۵</sup> استفاده شده است.

#### ساخت مدل (شبکه‌بندی میدان حل معادلات، شرایط مرزی و شرایط اولیه)

جعبه‌ابزار OpenFOAM یکی از بسته‌های منبع باز برای حل معادلات حاکم در جریان سیالات و انتقال حرارت می‌باشد که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. این بسته دارای

1. finite volume method
2. staggered grid
3. Preconditioned Biconjugate Gradient
4. Courant number
5. volume fraction

ارتفاع مناسب سرریز انتهایی از رابطه عمومی پیشنهاد شده توسط Bijankhan *et al.* (2013) به صورت زیر تعیین شده است:

$$\frac{h}{L_C} = 1.4404 \left( \frac{L_C}{P} \right)^{-0.97} \left( \frac{k_s}{P} \right) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

در این رابطه  $h$  عمق جریان روی تاج سرریز،  $L_C$  پهنای سرریز،  $P$  ارتفاع سرریز و  $k_s$  عمق جریان بحرانی می باشد. عمق جریان و سرعت در ورودی و خروجی، از اندازه گیری های انجام شده در بالادست و پایین دست دریچه در هر آزمایش استخراج و به عنوان شرایط اولیه، در مدل وارد شده است. بدیهی است که این مقادیر صرفاً در زمان آغاز حل مورد استفاده قرار گرفته و در طول حل می تواند تغییر نماید. به این ترتیب، سرعت رسیدن به جواب نهایی افزایش می یابد.

### نتایج

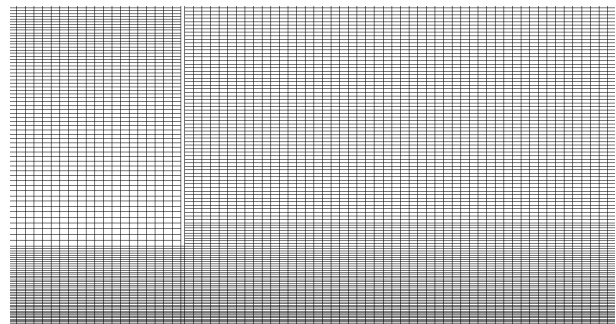
با به کارگیری حل گر interFOAM که از روش حجم سیال برای شبیه سازی سطح آزاد جریان استفاده می کند و سپس معادلات حاکم را به روش حجم محدود مورد تحلیل قرار می دهد، میدان حل مورد شبیه سازی قرار گرفته است. نتایج حاصل به صورت خروجی های متعددی قابل دسترسی است. با استفاده از نرم افزار ParaView 4.1.0 و دستورات مربوطه در OpenFOAM موارد زیر از خروجی های مدل، استخراج و سپس پردازش های لازم صورت گرفت.

#### پروفیل های سطح آب و توزیع سرعت

با به کارگیری روش حجم سیال برای شناسایی مرز سطح آزاد، محاسبات فاکتور  $\alpha$  در بالادست و پایین دست دریچه انجام شده است. در این تکنیک در صورتی که یک سلول محاسباتی کاملاً از سیال پر باشد مقدار  $\alpha = 1.0$  بوده و در صورتی که سلول کاملاً از سیال خالی باشد مقدار آن  $\alpha = 0.0$  می شود. لذا با انتخاب سیال به عنوان مرز سطح آزاد، فرض شده است که سلول های نیمه پر به عنوان حفاصل بین آب و هوا باشند. به این ترتیب، از نتایج محاسبات پارامتر  $\alpha$  توسط مدل، برای شناسایی سطح آزاد سیال استفاده شده است. در طول کانال، مقطعی که برای استخراج نتایج مدل انتخاب شده اند، همان مقطعی هستند که در آزمایشات Bijankhan (1993) اندازه گیری ها در آنجا انجام شده است. تعداد نقاط استخراج داده ها در امتداد عمق جریان نیز، ۵۰۰ نقطه انتخاب شده است. پروفیل های سرعت اندازه گیری شده و شبیه سازی شده در موقعیت های مشابهی استخراج و در عمق جریان ترسیم شده اند. این نتایج در

میلیمتر، در امتداد  $y$  بین ۱ تا ۵ میلیمتر و در امتداد  $z$  نیز ۲ میلیمتر در نظر گرفته شده است. امتداد  $x$  در جهت جریان، امتداد  $y$  در راستای قائم و امتداد  $z$  نیز در جهت عرض کانال می باشند. به این ترتیب، نسبت ابعاد سلول های محاسباتی، حداکثر حدود ۷ است.

نسبت ابعاد سلول های شبکه محاسباتی به صورت متغیر تعریف شده است. این شیب دهی حداکثر با نسبت ۲ انجام شده است تا نسبت ابعاد سلول ها، در حد مجاز قرار گیرد. شکل (۲) بخشی از مش بندی غیریکنواخت در بلوک های اطراف دریچه که تغییرات جریان شدیدتر است را نشان می دهد.



شکل ۲. مش بندی غیریکنواخت در اطراف دریچه

#### شرایط مرزی و شرایط اولیه:

شرایط مرزی مسئله شامل متغیرهای سرعت، فشار، انرژی جنبشی و نرخ استهلاک آن، پارامتر کسر حجمی و لزجت آشفته در مرزهای ورودی، خروجی، دیوارها (کف کانال و وجوه دریچه و سرریز) و سطح آزاد، به شرح جدول (۳) تعریف شده است.

جدول (۳) - شرایط مرزی مسئله

مرز	سرعت	فشار	$\alpha$	$k$	$\epsilon$	$\nu_t$
ورودی آب	fV	zG	fV	zG	zG	zG
ورودی هوا	fV	zG	fV	zG	zG	zG
خروجی	zG	zG	zG	zG	zG	zG
دیوارها	fV	zG	zG	kqRWF	eWF	nutkWF
اتمفر	iOV	zG	iO	iO	iO	calculated

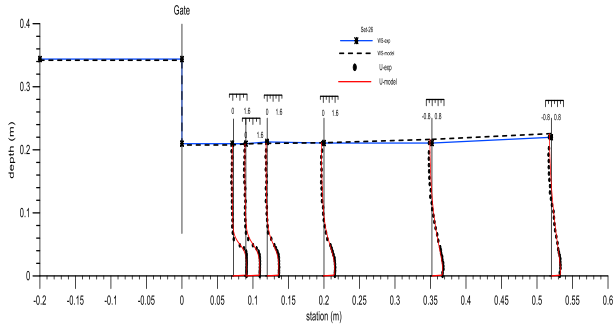
fV: fixed value, zG: zero gradient, iO: inletOutlet, iOV:

inletOutletVelocity, eWF: epsilonWallFunction, nutkWF:

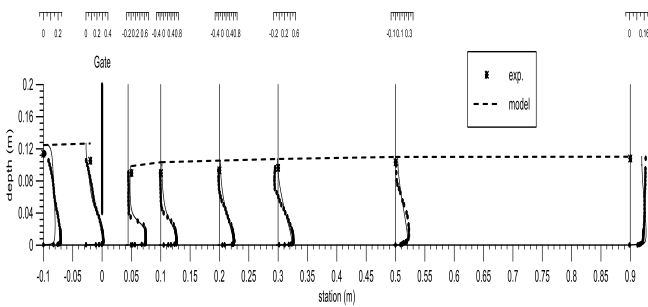
nutWallFunction, kqRWF: kqRWallFunction,  $\nu_t$ : turbulent viscosity

در برخی از مطالعات مشابه، شرایط مرزی به صورت متفاوتی تعریف شده اند. به عنوان مثال Cassan and Belaud (2010) مقدار سرعت در ورودی را به صورت یک تابع لگاریتمی برحسب عمق وارد نموده اند. در تحقیق حاضر، مقادیر سرعت در ورودی آب، به صورت یکنواخت اعمال گردیده است. ایجاد شرایط پایاب با در نظر گرفتن یک سرریز با ارتفاع مناسب، صورت گرفته است.

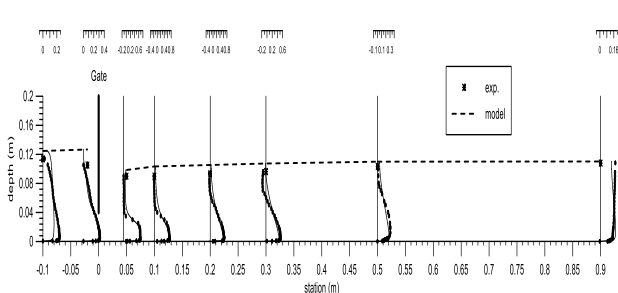




شکل ۶- پروفیل سطح آب و توزیع سرعت در پایین دست دریچه در set-26 به منظور بررسی بیشتر عملکرد مدل، علاوه بر مقایسه فوق، مقایسه ای با داده های اندازه گیری (Gumus et al (2015) نیز انجام شده است. در آن تحقیق جریان در یک کانال مستطیلی به عرض ۰/۲ متر و ارتفاع ۰/۲۵ متر برای دریچه ای با بازدهی ۴ سانتیمتر و دبی ۳/۶۳ و ۶/۰۵ لیتر بر ثانیه اندازه گیری شده است. مقایسه پروفیل های سرعت در مقاطع مختلف در پایین دست دریچه در اشکال (۷) و (۸) انجام شده است.



شکل ۷- پروفیل سطح آب و توزیع سرعت در پایین دست دریچه در دبی ۳/۶۳ لیتر بر ثانیه و مقایسه با اندازه گیری های (Gumus et al. (2015)



شکل ۸- پروفیل سطح آب و توزیع سرعت در پایین دست دریچه در دبی ۶/۰۵ لیتر بر ثانیه و مقایسه با اندازه گیری های (Gumus et al. (2015)

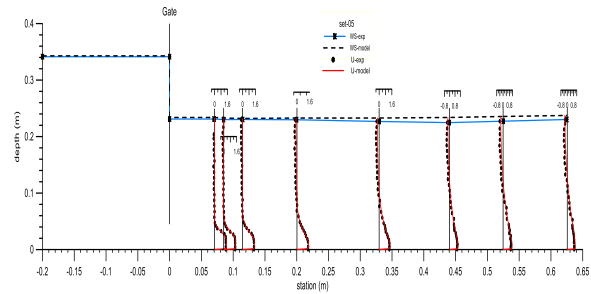
انطباق مناسب بین نتایج مدل و این اندازه گیری ها موید عملکرد مناسب مدل است.

#### پروفیل های سرعت بدون بعد

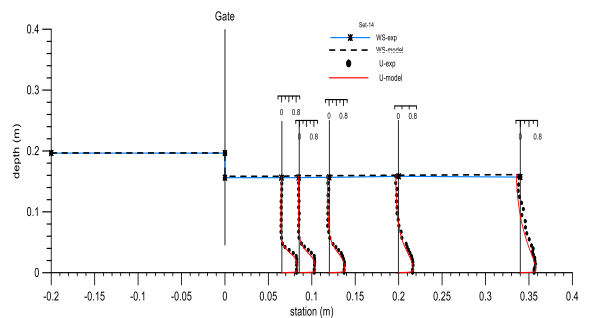
بر اساس مطالعات Suarez and Kosart (1961) و (1965) Rajaratnam الگوی جریان مستغرق در مقطع انقباض را می توان به دو ناحیه جریان روبه جلو و جریان برگشتی، تقسیم نمود. با در نظر گرفتن عمق  $d_1$  به عنوان عمقی از جریان که سرعت آن

فاصله های مختلف در پایین دست دریچه تهیه و به صورت نمونه در شکل های (۳) تا (۶) نشان داده شده است.

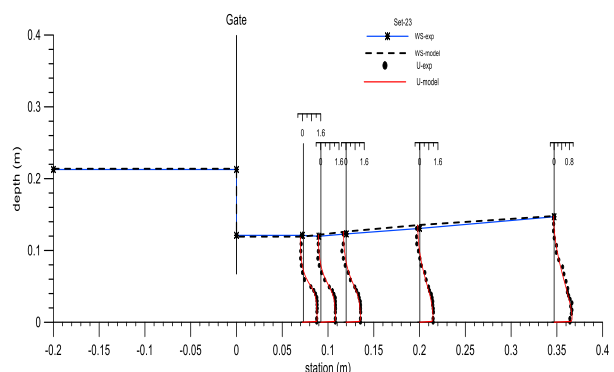
همان گونه که در این اشکال ملاحظه می شود، تطابق مناسبی بین پروفیل های سطح آب و سرعت های محاسبه شده و اندازه گیری شده وجود دارد. اما در یک نگاه کلی، عمق جریان محاسبه شده توسط مدل عددی، کمی بیشتر از مقادیر اندازه گیری ها می باشد. دلیل اصلی این تفاوت ها، عمدتاً به عدم تاثیر جریان های گردابه ای روی سطح آزاد سیال و در نواحی توسعه جریان در پایین دست دریچه در مدل دوبعدی منسوب می شود. این موضوع چنان که در ادامه نیز تشریح شده است، مبین خطای به کارگیری مدل دوبعدی برای جریانی است که حداقل در سطح آزاد، در سه امتداد دارای تغییرات بوده و حتی در مقیاس بزرگ نیز سه بعدی است.



شکل ۳- پروفیل سطح آب و توزیع سرعت در پایین دست دریچه در set-05

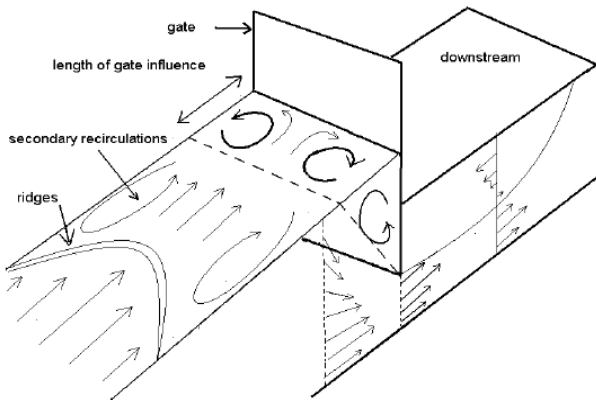


شکل ۴- پروفیل سطح آب و توزیع سرعت در پایین دست دریچه در set-14



شکل ۵- پروفیل سطح آب و توزیع سرعت در پایین دست دریچه در set-23

دوبعدی بودن کامل، مولفه عرضی سرعت طبیعتاً صفر بوده است.

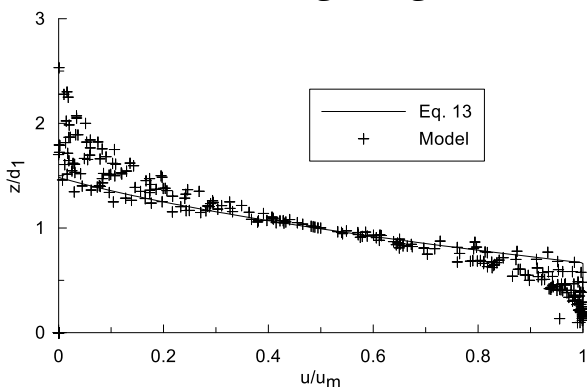


شکل ۱۰. الگوی جریان در اطراف دریچه کشویی (Cassan and Belaud 2010)

در تحقیقی که Bijankhan et al. (2017) منتشر نموده است، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، رابطه زیر را بین  $u/u_m$  و  $z/d_1$  ارائه نموده است:

$$\frac{u}{u_m} = \begin{cases} 1 & 0 \leq z/d_1 \leq 0.66 \\ 0.6375 \left(\frac{z}{d_1}\right)^2 - 2.5972 \left(\frac{z}{d_1}\right) + 2.45 & 0.66 < z/d_1 \leq 1.483 \end{cases} \quad (\text{رابطه } 13)$$

مقایسه نتایج مدل با این رابطه در شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود. همان‌گونه که مشهود است، نتایج مدل با نتایج این تحقیق انطباق خوبی نشان می‌دهد.



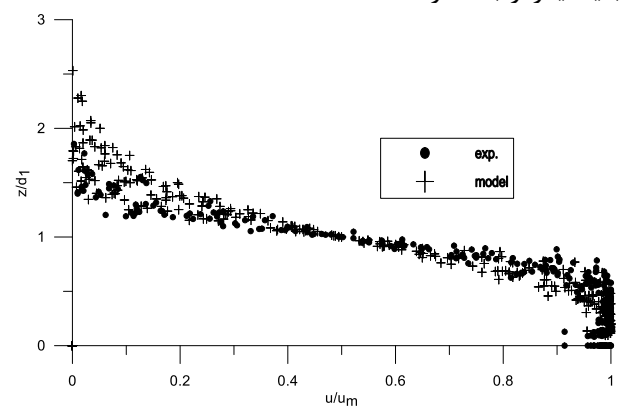
شکل ۱۱. پروفیل‌های سرعت روبه‌جلو بدون‌بعدشده در پایین‌دست دریچه و مقایسه با رابطه (۱۳) ارائه شده توسط Bijankhan et al. (2017)

در نمودار شکل (۱۲) پارامتر  $u_m/U$  در مقابل  $y_1/w$  ترسیم شده است که در آن  $U = q/y_1$  می‌باشد. متغیر  $y_1$  عمق جت مستغرق خروجی از دریچه است. Bijankhan (2014) براساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، رابطه زیر را بین این متغیرها پیشنهاد داده است:

$$\frac{u_m}{U} = 1.5299 \frac{y_1}{w} \quad (\text{رابطه } 14)$$

نصف سرعت ماکزیمم ( $u_m/2$ ) است، با رسم  $u/u_m$  در مقابل  $z/d_1$  می‌توان به یک تعریف عمومی از جریان روبه‌جلو دست یافت.

این متغیرها برای تمام آزمایشات محاسبه شده و نتایج حاصل از مدل در شرایط مشابه تهیه و نمودار مربوط به آن در شکل (۹) ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل (۹) دیده می‌شود، نتایج مدل در تخمین عمق جریان با داده‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی انطباق مناسبی دارد. در خصوص شناسایی پروفیل سرعت، تطابق این متغیر در ناحیه جریان مثبت و به‌ویژه محدوده هسته مرکزی سرعت<sup>۱</sup> بسیار خوب است. اما در نواحی که سرعت جریان منفی بوده و جریان‌های برگشتی شکل می‌گیرد و همچنین در سطح جریان، اختلاف‌هایی بین نتایج حاصل از مدل و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به چشم می‌خورد. البته این اختلاف در دو ناحیه مذکور تا حدود زیادی به یکدیگر ارتباط دارند.

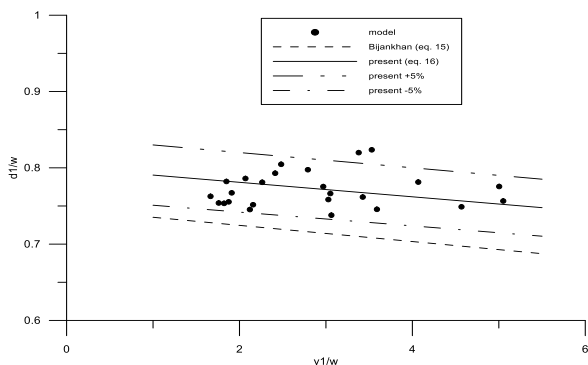


شکل ۹. پروفیل‌های سرعت رو به جلو بدون‌بعدشده در پایین‌دست دریچه

فقدان جریان‌های سطحی ثانویه باعث شده است که در جریان‌های زیرسطحی، مقادیر سرعت بزرگتر از آن چیزی باشد که در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مشاهده شده است. با نگاهی به الگوی جریان توصیفی توسط Cassan and Belaud (2010) در شکل (۱۰)، وجود و اهمیت این جریان‌های ثانویه تایید می‌شود. شکل‌گیری ورتکس‌های قائم به‌ویژه در ناحیه جریان در حال توسعه نزدیک دریچه و شکسته شدن آن‌ها در این ناحیه تحت تاثیر لایه برشی روی جت مستغرق و ناحیه جریان چرخشی روی آن، توسط محققین گزارش شده است (Jesudhas et al. and Javan and Eghbalzadeh (2016)). حال آن‌که، در مدل‌سازی دوبعدی چنین الگویی عملاً شکل نمی‌گیرد. در نتایج حاصل از مدل عددی حاضر نیز با توجه به

1. potential core

حاصل از به کارگیری مدل عددی کاهش می یابد چراکه اثرات دیواره کمتر شده است.



شکل ۱۳. تغییرات  $y_1/w$  در مقابل  $d_1/w$  و معادله پیشنهادی

نکته مهم دیگری که از مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی دوبعدی با اندازه گیری های آزمایشگاهی در دو نمودار اخیر دیده می شود این است که، مدل در برآورد جریان های رو به جلو، درستی بالایی را نشان می دهد، چراکه مقادیر سرعت حداکثر  $u_m$  در نمودار شکل (۱۲) تطابق مناسبی با اندازه گیری ها دارد. اما در شناسایی موقعیت این مولفه، تفاوت پیدا کرده است.

#### ارتفاع هسته پتانسیل

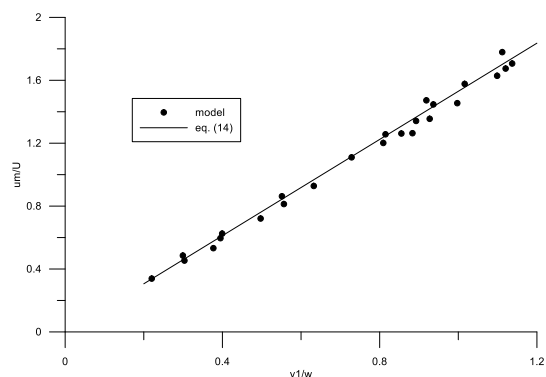
همان گونه که در شکل (۱۰) دیده می شود، جت مستغرق تا ارتفاع معینی از کف کانال به صورت جریان رو به جلو<sup>۲</sup> بوده و با شکل گیری یک لایه برشی<sup>۳</sup> جریان چرخشی<sup>۴</sup> روی آن ایجاد می شود. موقعیت این نواحی به سادگی قابل تشخیص نیست. با تعریف هسته پتانسیل<sup>۵</sup> به صورت ناحیه ای که سرعت به ۹۰ درصد سرعت حداکثر می رسد، ارتفاع این ناحیه شناسایی و با  $y_{PC}$  اسم گذاری شده است. در واقع هسته پتانسیل ضخامت از جریان رو به جلو در ناحیه زیر دریچه است که سرعت در این ناحیه کمتر از ۹۰ درصد سرعت حداکثر خروجی از زیر دریچه نیست. ارتفاع این ناحیه از کف کانال که در آن سرعت از سرعت حداکثر به ۹۰ درصد مقدار آن می رسد، به عنوان  $y_{PC}$  در نظر گرفته شده است. این پارامتر در مقاطع مختلف پایین دست دریچه از داده های اندازه گیری و نتایج مدل استخراج شده است. اشکال (۱۴) تا (۱۹) تغییرات ارتفاع هسته پتانسیل را در مقابل نسبت استغرق در مقاطع مختلف پایین دست دریچه نشان می دهند. اختلاف این مقادیر محاسبه شده است و تغییرات آن

این خط در نمودار مذکور ترسیم شده است و ملاحظه می شود که انطباق خوبی بین رابطه مذکور و نتایج حاصل از مدل وجود دارد. همچنین نسبت  $d_1/w$  در مقابل  $y_1/w$  نیز در نمودار شکل (۱۳) ترسیم گردیده است. معادله پیشنهادی توسط بی جن خان (۱۳۹۳) برای این متغیرها به صورت زیر است:

$$\frac{d_1}{w} = 0.7458 - 0.0106 \frac{y_1}{w} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

این معادله به منظور تخمین پارامتر  $d_1$  می تواند مورد استفاده قرار گیرد. همان گونه که در این شکل ملاحظه می شود، نتایج معادله نیازمند تعدیل مشخصی در جهت قائم است تا با نتایج حاصل از مدل عددی تطابق مناسبی پیدا کند. این میزان تعدیل به وسیله معادله زیر حاصل می شود:

$$\frac{d_1}{w} = 0.8 - 0.0095 \frac{y_1}{w} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$



شکل ۱۴. تغییرات  $u_m/U$  در مقابل  $y_1/w$  و معادله پیشنهادی

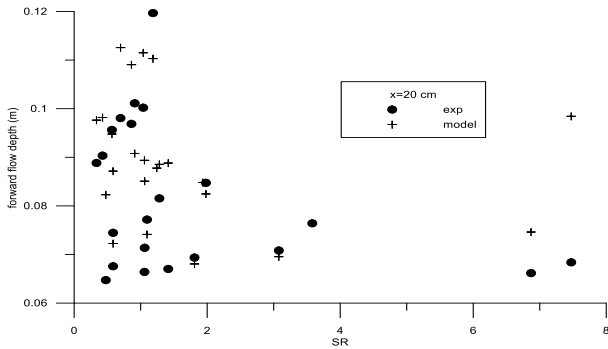
عدم شکل گیری جریان های برگشتی شدید روی جت مستغرق، که منتج از عدم شکل گیری جریان های ثانویه سطحی می تواند باشد و این به نوبه خود به دلیل استفاده از مدل دوبعدی است، دلیل این اختلاف تشخیص داده می شود. این اثرات با افزایش عرض کانال کاهش نشان می دهند. چرا که در چنین شرایطی، اثرات دیواره ها روی جریان متوسط کمتر می شود. در تایید این موضوع، می توان به بحثی که توسط (2016) Ghavidel *et al.* بر روی تحقیق منتشر شده توسط (2015) Gumus *et al.* منتشر شده است، اشاره نمود. ساخت مدل دوبعدی برای جریان مستغرق پایاب دریچه توسط (2015) Gumus *et al.* با خطای نسبی مطلق<sup>۱</sup> تا بیش از ۹۰ درصد در پروفیل های سرعت پایین دست دریچه، همراه بوده است. اما بر اساس نتایج مدل عددی تهیه شده توسط (2016) Ghavidel *et al.*، مشخص شد که چنانچه عرض کانال زیاد باشد، خطای

2. Forward flow  
3. Shear layer  
4. Roller  
5. Potential core

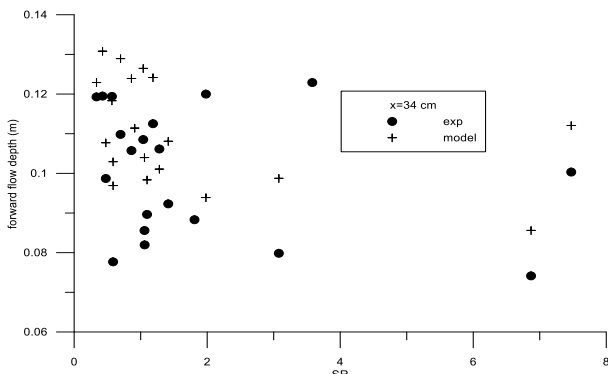
1. absolute relative error

در مقابل نسبت استغراق در نمودار شکل (۲۰) ارائه گردیده است. در این شکل، شرایط حاکم در جریانی که زیر بحرانی ترین رژیم و بیشترین نسبت استغراق را داشته است، از خطای زیادی برخوردار می باشد. در این شرایط، به نظر می رسد اختلاط جریان رو به جلو و جریان برگشتی روی آن، باعث رفتار متفاوت جریان گردیده است.

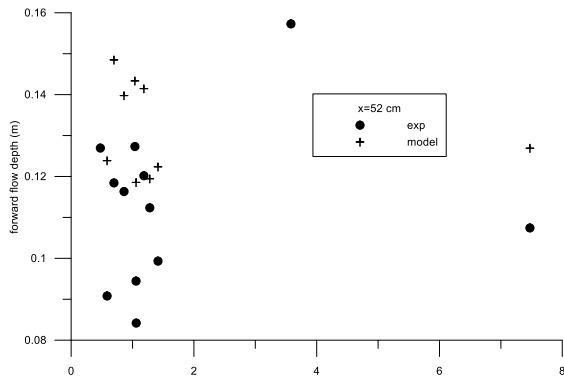
نکته دیگری که از این شکل قابل نتیجه گیری است، کاهش اختلاف بین نتایج مدل عددی و اندازه گیری های آزمایشگاهی در مقاطعی است که از دریاچه دورتر هستند. با کمتر شدن اثرات لایه برشی در فواصل دورتر از دریاچه و در نواحی که جریان توسعه یافته می شود، چنین روندی قابل انتظار است. کاهش اثرات ورود هوا به درون جریان در فواصل دورتر نسبت به دریاچه نیز از جمله دلایل این موضوع تلقی می شود. این موضوع در شکل (۲۱) به وضوح دیده می شود.



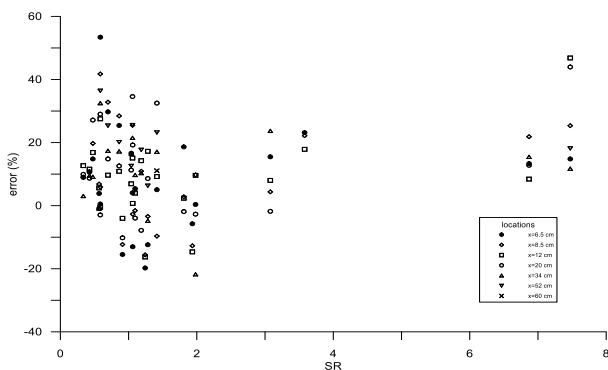
شکل ۱۷. تغییرات ارتفاع هسته پتانسیل با نسبت استغراق در مقطع در پایین دست دریاچه  $x = 20.0$  cm



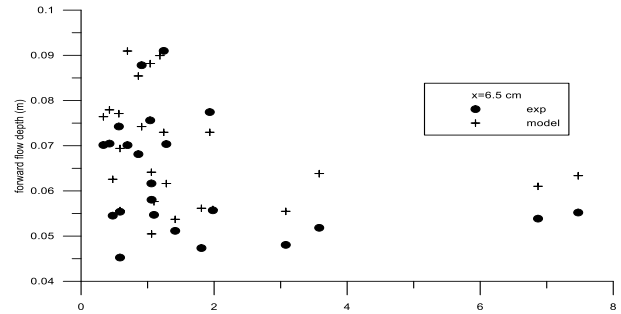
شکل ۱۸. تغییرات ارتفاع هسته پتانسیل با نسبت استغراق در مقطع در پایین دست دریاچه  $x = 34.0$  cm



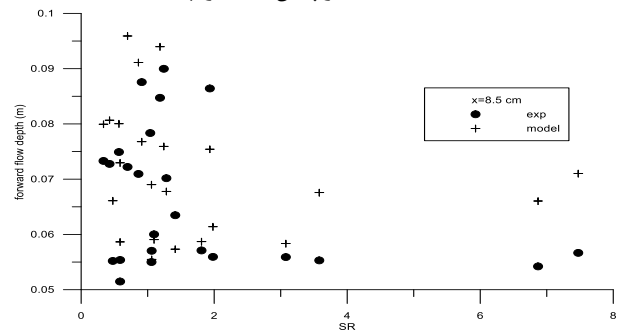
شکل ۱۹. تغییرات ارتفاع هسته پتانسیل با نسبت استغراق در مقطع در پایین دست دریاچه  $x = 52.0$  cm



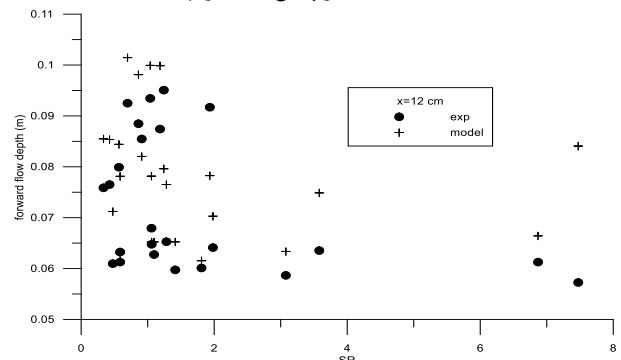
شکل ۲۰. خطای مقدار ارتفاع هسته پتانسیل بین داده های اندازه گیری های آزمایشگاهی و نتایج مدل عددی در مقابل نسبت استغراق در مقاطع مختلف پایین دست دریاچه



شکل ۱۴. تغییرات ارتفاع هسته پتانسیل با نسبت استغراق در مقطع در پایین دست دریاچه  $x = 6.5$  cm



شکل ۱۵. تغییرات ارتفاع هسته پتانسیل با نسبت استغراق در مقطع در پایین دست دریاچه  $x = 8.5$  cm



شکل ۱۶. تغییرات ارتفاع هسته پتانسیل با نسبت استغراق در مقطع در پایین دست دریاچه  $x = 12.0$  cm

کمتر می‌باشد. اما در جریان‌های مستغرق که فوق‌بحرانی نیستند، نواحی جریان‌های روبه‌جلو و جریان چرخشی روی آن، از یکدیگر مجزا نشده و اثرات گردابه‌های کوچک بیشتر است. لذا در شرایط اخیر، خطای مدل عددی افزایش یافته است. البته این اختلاف در مقاطع نزدیک به دریچه که گردابه‌های قائم قدرتمندتری وجود دارند، بیشتر است. اثرات میزان استغراق بر روی پارامتر عمق جریان رو به جلو، ملموس است. با افزایش نسبت استغراق، ارتفاع هسته پتانسیل کاهش می‌یابد.

به‌دلیل دوبعدی بودن مدل عددی، جریان‌های ثانویه به‌ویژه در سطح آزاد سیال، شکل نگرفته است. این موضوع باعث شده است ضمن آن که پروفیل سطح آب با اختلاف اندکی، بالاتر از مقادیر اندازه‌گیری شده باشد، سرعت‌های منفی در پروفیل نیز به‌خوبی بر اندازه‌گیری‌ها منطبق نباشد. همچنین تخمین عمقی که سرعت در آن نصف سرعت حداکثر است، دارای خطا می‌باشد. هرچند فرض دوبعدی بودن جریان در جهش مستغرق پایین‌دست دریچه کشویی، با واقعیت منطبق نبوده و باعث بروز برخی نواقص و مقداری خطا است، اما در تخمین مولفه‌های اصلی جریان، منجر به نتایج درست و قابل‌قبولی می‌شود. درستی نتایج حاصل از مدل دوبعدی در ناحیه جریان توسعه‌یافته، به تایید رسیده است. لذا با عنایت به صرفه‌جویی‌های قابل‌توجهی که مدل دوبعدی نسبت به یک مدل سه‌بعدی در هزینه‌های محاسباتی تامین می‌کند، در فرآیندهای با مقیاس بزرگ و متوسط‌گیری‌شده، قابل به‌کارگیری است.

### سپاسگزاری

بدینوسیله از همکاری‌های مرکز HPC(High Performance Computers) دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) و کارشناس محترم آن تشکر و قدردانی می‌شود.

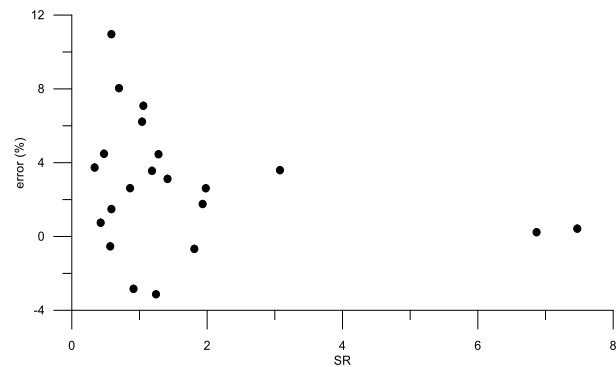
### REFERENCES

Akoz, M., Kirkgoz, M., Oner, A. (2009). "Experimental and numerical modeling of a sluice gate flow." *J. Hydraul. Res.*, 47(2), 167-176.

Belaud, G., Cassan, L., and Baume, J.-P. (2009). "Calculation of contraction coefficient under sluice gates and application to discharge measurement." *J. Hydraul. Eng.*, 135(12), 1086-1091.

Bijankhan, M., Di Stefano, C., Ferro, V., and Kouchakzadeh, S. (2013). "New stage-discharge relationship for weirs of finite crest length." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 10.1061/(ASCE)IR.1943.4774.0000670.

Bijankhan, M., Kouchakzadeh, S., & Belaud, G.



شکل ۲۱. خطای نتایج مدل عددی و مقادیر اندازه‌گیری‌شده در تخمین عمق پایاب

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل عددی دوبعدی ساخته‌شده برای شبیه‌سازی جریان خروجی از یک دریچه کشویی در حالت مستغرق، نشان داده است که عملکرد کلی مدل مناسب است. بسته دینامیک سیالات OpenFOAM و حل‌گر سطح آزاد interFOAM و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  توانایی شبیه‌سازی جریان را داشته‌اند و درستی مورد نظر را تامین نموده است. پروفیل سطح آب و پروفیل‌های سرعت در عمق، به‌ویژه در ناحیه جریان رو به جلو، با درستی خوبی شبیه‌سازی شده‌اند. عمق جت مستغرق و ضریب انقباض به‌نحو مناسبی شکل گرفته و نتایج مدل با روابط و اندازه‌گیری‌های موجود تطابق قابل‌قبولی نشان می‌دهد.

ضرایب معادله‌های مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  بر اساس پیشنهاد ارائه شده در تحقیقات مشابه، انتخاب شده است و در تمامی مدل‌های ساخته‌شده در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. براساس نتایج حاصل از مدل، نیازی به تغییر آن‌ها و کالیبراسیون مدل نبوده است. لذا در محدوده مورد شبیه‌سازی در این تحقیق، ضرایب مذکور قابل توصیه هستند.

اختلاف نتایج حاصل از مدل عددی با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در شرایطی که جریان فوق‌بحرانی بوده است،

(2017). "Application of the submerged experimental velocity profiles for the sluice gate's stage-discharge relationship." *Flow Measurement and Instrumentation*, 54, 97-108.

Cassan, L., Belaud, G. (2010). "Experimental and numerical studies of flow structure generated by a submerged sluice gate." *Proc. 1<sup>st</sup> Eur. IAHR Cong.*, Edinburgh, UK.

Cassan, L., and Belaud, G. (2011). "Experimental and numerical investigation of flow under sluice gates." *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)Hy.1943-7900.0000514.

Castro-Orgaz, O., and Hager, W.H. (2010). "Classical hydraulic jump: basic flow features." *J. Hydraul. Res.*, 47(6), 744-754.

- Fluent, I.N.C. (2006). "FLUENT 6.3 user's guide." *Fluent documentation*. French, R. H., & French, R. H. (1985). "Open-channel hydraulics."
- Furbo, E. (2010). "Evaluation of RANS turbulence models for flow problems with significant impact of boundary layers."
- Ghavidel M., Kouchakzadeh S., Bijankhan M., Belaud G. (Accepted). "Discussion of 'Numerical modeling of submerged hydraulic jump from a sluice gate'." *J. Irrig. Drain. Eng.*
- Gumus, V., Simsek, O., Soydan, N., Akoz, M., and Kirkgoz, M. (2015). "Numerical modeling of submerged hydraulic jump from a sluice gate." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 10.1061/(ASCE)IR.1943.4774.0000948.
- Gunal, M., and Narayanan, R. (1998). " $k - \epsilon$  turbulence modeling of submerged jumps using boundary-fitted coordinates." *Proc. of the Institution of Civil Eng.-Water, Maritime and Energy*, 130(2), 104-114.
- Javan, M., and Eghbalzadeh, A. (2013). "2D numerical simulation of submerged hydraulic jumps." *Appl. Math. Modell.*, 37(10), 6661-6669.
- Jesudhas, V., Roussinova, V., Balachandar, R., and Barron R. (2016), "Submerged hydraulic jump study using DES." *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001231.04016091-1.
- Habibzadeh, A., Wu, S., Ade, F., Rajaratnam, N., and Loewen, M.R. (2011), "Exploratory study of submerged hydraulic jumps with blocks." *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(683), 683-688.
- Hernandez, O., and Schnoebelen, D. J. (2011). "Comparison of OpenFOAM and FLUENT for steady, viscous flow at pool 8, Mississippi river."
- Hirt, C., and Nichols, B. (1981). "Volume of Fluid (VoF) method for the dynamics of free boundaries." *J. Comput. Phys.*, 39(1), 201-225.
- Kim, D. (2007). "Numerical analysis of free flow past a sluice gate." *KSCE, J. Civil Eng.*, 11(2), 127-132.
- Long, D., Steffler, P. M., Rajaratnam, N. (1990). "LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump." *Journal of Hydraulic Research*, 28(4), 437-460.
- Long, D. (1991). "An experimental investigation and  $k - \epsilon$  turbulence modeling of submerged hydraulic jumps." Department of Civil Eng., University of Alberta, Edmonton, Canada.
- Long, D., Steffler, P. M., Rajaratnam, N. (1991). "A numerical study of submerged hydraulic jumps." *Journal of Hydraulic Research*, 29(3), 293-308.
- Lopes, P. (2013). "Free-surface flow interface and air-entrainment modelling using OpenFOAM (Doctoral dissertation)."
- Ma, F., Hou, Y., and Prinos, P. (2001). "Numerical calculation of submerged hydraulic jumps." *J. Hydraul. Res.*, 39(5), 493-503.
- Nasehi Oskuyi, N., and Salmasi, F. (2012). "Vertical sluice gate discharge coefficient." *J. Civil Eng. Urban*. 2(3), 108-114.
- Patankar, S.V., and Spalding, D.B. (1972). "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows." *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15(10), 1787-1806.
- Raiford, J.P., and Khan, A.A. (2013). "Turbulence schemes for modeling a submerged hydraulic jump." *Eng. And Comp. Mechanics.*, 166(EM1), 40-51.
- Soares, D. V., Loureiro, J. B. R., da Silva Freire, Á. P., & da Fontoura Rodrigues, J. L. A. (2005). "Numerical Simulation of Turbulence in Open-Channel Flows." *Ret*, 11(1Re), 1.
- Sun, R., & Xiao, H. (2016). "Realistic representation of grain shapes in CFD-DEM simulations of sediment transport: A Bonded-Sphere approach." *arXiv preprint arXiv:1608.01049*.
- Shu, B., Dammel, F., & Stephan, P. (2011). "Implementation of the level set method into OpenFOAM for capturing the free interface in incompressible fluid flows." In *Proceedings of 5th Open Source CFD International Conference*.
- Versteeg, H.K., and Malalasekera, W. (2007). "An introduction to computational fluid dynamics-The finite volume method." 2<sup>nd</sup> ed., Pearson Educational Limited, ISBN: 978-0-13-12-7498-3, Edinburgh Gate, Harlow, Essex CM20 2JE, England.
- Yen, J. F., Lin, C. H., Tsai, C. T. (2001). "Hydraulic characteristics and discharge control of sluice gates." *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 24(3), 301-310.
- Youngs, D. L. (1984). "An interface tracking method for a 3D Eulerian hydrodynamics code." *Technical Report*, (44/92), 35.
- Bijankhan, M. (2014) "The hydraulics of parallel sluice gates in open channels", a thesis submitted to the school of graduate studies University of Tehran in partial fulfillment of the requirement for the degree of PhD in Hydraulic structures.
- Karimi, R., Eghbalzadeh, A, and Javan M, (2010) "Comparison of different turbulence models for simulating hydraulic jump downstream of a sluice gate", ninth Iranian Hydraulic conference, Tarbiat Modares University.
- Khajeh pour, M, Eghbalzadeh, A, and Javan M, (2010) "Numerical simulation of turbulent wall sheet jets in shallow waters", ninth Iranian Hydraulic conference, Tarbiat Modares University.
- Miniatur, E., Javan, M., Eghbalzadeh, A, and Shokri, A., (2011) "Comparison of VOF and Mixture models in simulation of submerged hydraulic jump downstream of a sluice gate", tenth Iranian Hydraulic conference, Guilan University.