

شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریز جانبی کنگره‌ای به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)

فاطمه عطارزاده^۱، سعید رضا خدائشناس^{۲*}، علی نقی ضیائی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۶/۲۶

چکیده

در پژوهش حاضر جریان پیرامون سرریزهای جانبی کنگره‌ای با استفاده از شش مدل مختلف مقیاس زیر شبکه‌ای در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) و نیز چهار مدل مبتنی بر RANS به صورت سه بعدی در اندازه شبکه محاسباتی مختلف با استفاده از نرم‌افزار ANSYS FLUENT مدل‌سازی شد و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. با مقایسه نتایج دبی و پروفیل سطح آب به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی، مدل مقیاس زیر شبکه مناسب در روش LES برای مطالعات هیدرودینامیک و پارامتریک انتخاب شد و با بهترین مدل مبتنی بر RANS (مدل K-ε-Standard) مقایسه شد. نتایج هر دو مدل با مقادیر آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد. هر چند پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل مبتنی بر RANS نسبت به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ از دقت بالاتری برخوردار است اما روش LES می‌تواند الگو و رفتار پیچیده‌ی جریان را با جزئیات بیشتری نسبت به مدل مبتنی بر RANS پیش‌بینی نماید. بنابراین با توجه به نتایج مناسب به دست آمده از مقایسه دبی‌ها و پروفیل‌های سطح آب آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی و نیز اطمینان در مورد توانایی نسبتاً بالای روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، پارامترهای توزیع سرعت، جریان ثانویه و توزیع تنش برشی در کانال‌های دارای سرریز جانبی کنگره‌ای مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: سرریز جانبی کنگره‌ای، شبیه‌سازی تالطم، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، مدل مقیاس زیر شبکه‌ای

مقدمه

بیشتر می‌گردد. رفتار هیدرولیکی جریان در سرریزهای جانبی از نوع متغیر مکانی با کاهش دبی می‌باشد و تحلیل آن نسبتاً پیچیده است. بدیهی است تخمین دقیق الگوی جریان و نیز شدت جریان می‌تواند در طراحی دقیق و اصولی سرریزهای جانبی موثر باشد. در مورد جریان متغیر مکانی پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. برای نمونه کوچک‌زاده و همکاران (۲۰۰۱) روش اصلاح شده ریاضی آشفتگی را برای حل معادلات دیفرانسیلی غیر خطی جریان متغیر مکانی به کار بردند. وطن‌خواه محمدآبادی (۲۰۱۱) روش انتگرالگیری مستقیم را برای معادلات جریان متغیر مکانی در کانال‌های سهموی استفاده نمود. در این مطالعه با استفاده از معادله مانینگ، حل نیمه تحلیلی برای محاسبه طول پروفیل جریان متغیر مکانی در این کانال‌های توسعه یافت. دیمارچی برای اولین بار معادله جریان متغیر مکانی با کاهش دبی را با فرض ثابت بودن انرژی در طول سرریز، برای کانال‌های افقی مستطیلی با صرف نظر از اصطکاک حل نمود (De-Marchi, 1934). آکرز مقادیر مختلفی را برای ضریب دبی در حالتی که عمق آب در فاصله‌ای دور از سرریز جانبی اندازه‌گیری شود، برای حالتی که عمق آب در روی سرریز جانبی

سرریزهای جانبی یکی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد که به منظور آبیاری کانال‌های فرعی از کانال اصلی، انحراف آب مازاد به سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری، و نیز به عنوان سازه اضطراری در تاسیسات آبی بزرگ مانند سدها و شبکه‌های آبیاری و زهکشی برای کنترل سیلاب و محافظت از سازه‌های پایین دست به کار برده می‌شود. در طرح‌های جدید از سرریز جانبی به منظور جداسازی رسوب و کاهش بار بستر استفاده می‌شود. یکی از راهکارهای موثر اقتصادی جهت افزایش راندمان اینگونه سرریزها، استفاده از سرریزهای کنگره‌ای می‌باشد که با تغییر هندسه‌ی پلان و افزایش طول سرریز در بازشدگی ثابت از کانال، ظرفیت عبور جریان

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(* نویسنده مسئول: Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

اندازه‌گیری شود، پیشنهاد نمود (Ackers, 1957). سابرامانیا و آواستی نشان دادند که افت جریان در اثر وجود سرریز جانبی در ابتدای سرریز ناچیز می‌باشد. همچنین با اندازه‌گیری پروفیل‌های سرعت نشان دادند سرریز جانبی مستطیلی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در توزیع سرعت در مجاورت سرریز خواهد داشت (Subramanya and Awasthy, 1972). الخشاب و اسمیت، با مطالعات آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که فرض ثابت بودن انرژی در طول سرریز فرض صحیحی نیست (El-Khashab and Smith, 1976). برمن و هیگر به این نتیجه رسیدند که در جریان زیربحرانی، تفاوت پروفیل‌های سطحی محور کانال و دیوارهای جانبی ناچیز می‌باشد (Bremen and Hager, 1989). اولین تحقیق جدی بر روی سرریزهای جانبی کنگره‌ای در سال ۱۳۸۵ توسط نکویی انجام شد. ایشان بیان نمود که به علت بالارفتن طول مؤثر به طول ظاهری در سرریز جانبی کنگره‌ای، این نوع سرریز کارایی زیادی دارند. امیراغلو و همکاران به بررسی سرریزهای جانبی تک منقاری در کانال‌های مستطیلی پرداختند. ایشان دریافتند که مقدار ضریب دبی سرریز جانبی کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای جانبی معمولی بیشتر است (Emiroglu et al., 2009). زاهدی خامنه و همکاران نیز تاثیر پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی را بر روی ضریب دبی سرریز جانبی در سرریزهای جانبی نیم‌دایره‌ای مورد بررسی قرار دادند و روابط جدیدی را برای برآورد ضریب دبی سرریز ارائه کردند (Zahedi Khameneh et al., 2014). اسماعیل‌پور و همکاران (۱۳۹۵) ضریب دبی و پروفیل سطح آب در سرریز جانبی کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای یکطرفه تحت شرایط جریان زیربحرانی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که در سرریزهای کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای ضریب دبی نسبت به سرریز جانبی مستطیلی ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. خلیلی و هنر ضریب دبی سرریز جانبی نیم‌دایره‌ای را در سه ارتفاع و سه شعاع در شرایط زیربحرانی به دست آوردند و برای هر یک روابطی را ارائه نمودند (Khalili and Honar, 2017). ایشان دریافتند که مقدار ضریب دبی سرریز جانبی نیم‌دایره‌ای نسبت به سرریزهای جانبی دیگر بیشتر است. ولایتی و وطن‌خواه محمدآبادی (۱۳۹۸) دبی سرریز جانبی لبه پهن ذوزنقه‌ای را براساس تئوری جریان متغیر مکانی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که ضریب دبی سرریز به عدد فرود جریان بالادست، نسبت عمق جریان به پهنای سرریز و شیب جداره جانبی سرریز بستگی دارد.

امروزه با پیشرفت در محاسبات کامپیوتری، از مدل‌های عددی در شبهه‌سازی جریان، به دلیل محدودیت‌ها و هزینه‌های بالای آزمایشگاه و نیز صرفه‌جویی در زمان استفاده می‌گردد. آیدین جریان سطحی آزاد بر روی سرریز جانبی را با استفاده از نرم افزار FLUENT شبهه‌سازی نمود و مدل‌های آشفتگی مختلف (Spalart-Allmaras, K- ϵ -Standard³, K- ϵ -RNG², K- ϵ -Realizable, k- ω , and RSM¹) را برای شبهه‌سازی سطح آب استفاده کرد. نتایج ایشان نشان داد که کلیه مدل‌ها، جریان را به خوبی مدلسازی نموده‌اند و مدل RSM دارای دقت بالاتری در تعیین نوسانات و گردابه‌ها در نزدیکی سرریز است (Aydin, 2012). آیدین و امیراغلو کارایی شبهه‌سازی عددی را در تعیین رفتار هیدرولیکی جریان در نزدیکی سرریز جانبی منقاری مورد تایید قرار دادند (Aydin and Emiroglu, 2013). ضیایی و همکاران جریان پیرامون یک سرریز جانبی کنگره‌ای را با استفاده از نرم‌افزار Fluent به صورت سه‌بعدی با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی شبهه‌سازی نمود. در این پژوهش روش حجم سیال^۴ (VOF) برای شبهه‌سازی سطح مشترک و معادلات سه بعدی آرام و متلاطم، برای مدل‌سازی ترم تنش رینولدز استفاده شده است. بررسی‌های او نشان داد که کلیه مدل‌ها تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند اما نتایج مدل آشفتگی k- ϵ -Standard مناسب‌تر است (Ziaei et al, 2019).

با توجه به رشد و توسعه قدرت محاسباتی و نیاز روزافزون به حل دقیق جریان پیچیده پیرامون سازه‌های هیدرولیکی، روش شبهه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) می‌تواند به عنوان یک روش مهم در حل این نوع جریان‌ها محسوب شود. این روش بر اساس تقسیم‌بندی میدان جریان به دو قسمت مقیاس‌های حل شده و مقیاس‌های زیرشبکه می‌باشد. مقیاس‌های بزرگ مستقیماً توسط معادلات ناوراستوکس حل می‌شوند در صورتی که اثرات مقیاس‌های کوچک و تقابل آن‌ها با مقیاس‌های حل شده به صورت مدل وارد معادلات می‌گردد. در سال‌های اخیر کاربرد روش قدرتمند و پیشرفته روش LES در مهندسی هیدرولیک افزایش یافته است و چندین مدلسازی جریان بر روی سازه‌های هیدرولیکی مختلف با استفاده از روش LES انجام شده است. با توجه به اهمیت و پیچیده بودن تحلیل جریان بر روی سرریزهای جانبی کنگره‌ای، می‌توان با استفاده از روش قدرتمند شبهه‌سازی گردابه‌های بزرگ به بررسی خصوصیات هیدرولیکی و الگوی پیچیده جریان در محدوده سرریز پی برد که در پژوهش‌های پیشین از این روش استفاده نشده است. بنابراین هدف از پژوهش حاضر مدلسازی عددی جریان بر روی سرریز جانبی کنگره‌ای با استفاده از روش شبهه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) با کاربرد انواع مدل‌های مقیاس زیرشبکه‌ای^۶ (مدل SGS) و مقایسه آن با مدل‌های مبتنی بر متوسط‌گیری زمانی رینولدز^۷ (RANS) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان، معادلات ناویر-استوکس می‌باشد که برای جریان تراکم ناپذیر به صورت زیر نوشته می‌شود:

بقای جرم: معادله‌ی پیوستگی

امروزه با پیشرفت در محاسبات کامپیوتری، از مدل‌های عددی در شبهه‌سازی جریان، به دلیل محدودیت‌ها و هزینه‌های بالای آزمایشگاه و نیز صرفه‌جویی در زمان استفاده می‌گردد. آیدین جریان سطحی آزاد بر روی سرریز جانبی را با استفاده از نرم افزار FLUENT شبهه‌سازی نمود و مدل‌های آشفتگی مختلف (Spalart-Allmaras, K- ϵ -Standard³, K- ϵ -RNG², K- ϵ -Realizable, k- ω , and RSM¹) را برای شبهه‌سازی سطح آب استفاده کرد. نتایج ایشان نشان دادند سرریز جانبی مستطیلی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در توزیع سرعت در مجاورت سرریز خواهد داشت (Subramanya and Awasthy, 1972). الخشاب و اسمیت، با مطالعات آزمایشگاهی به این نتیجه رسیدند که فرض ثابت بودن انرژی در طول سرریز فرض صحیحی نیست (El-Khashab and Smith, 1976). برمن و هیگر به این نتیجه رسیدند که در جریان زیربحرانی، تفاوت پروفیل‌های سطحی محور کانال و دیوارهای جانبی ناچیز می‌باشد (Bremen and Hager, 1989). اولین تحقیق جدی بر روی سرریزهای جانبی کنگره‌ای در سال ۱۳۸۵ توسط نکویی انجام شد. ایشان بیان نمود که به علت بالارفتن طول مؤثر به طول ظاهری در سرریز جانبی کنگره‌ای، این نوع سرریز کارایی زیادی دارند. امیراغلو و همکاران به بررسی سرریزهای جانبی تک منقاری در کانال‌های مستطیلی پرداختند. ایشان دریافتند که مقدار ضریب دبی سرریز جانبی کنگره‌ای در مقایسه با سرریزهای جانبی معمولی بیشتر است (Emiroglu et al., 2009). زاهدی خامنه و همکاران نیز تاثیر پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی را بر روی ضریب دبی سرریز جانبی در سرریزهای جانبی نیم‌دایره‌ای مورد بررسی قرار دادند و روابط جدیدی را برای برآورد ضریب دبی سرریز ارائه کردند (Zahedi Khameneh et al., 2014). اسماعیل‌پور و همکاران (۱۳۹۵) ضریب دبی و پروفیل سطح آب در سرریز جانبی کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای یکطرفه تحت شرایط جریان زیربحرانی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که در سرریزهای کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای ضریب دبی نسبت به سرریز جانبی مستطیلی ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. خلیلی و هنر ضریب دبی سرریز جانبی نیم‌دایره‌ای را در سه ارتفاع و سه شعاع در شرایط زیربحرانی به دست آوردند و برای هر یک روابطی را ارائه نمودند (Khalili and Honar, 2017). ایشان دریافتند که مقدار ضریب دبی سرریز جانبی نیم‌دایره‌ای نسبت به سرریزهای جانبی دیگر بیشتر است. ولایتی و وطن‌خواه محمدآبادی (۱۳۹۸) دبی سرریز جانبی لبه پهن ذوزنقه‌ای را براساس تئوری جریان متغیر مکانی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که ضریب دبی سرریز به عدد فرود جریان بالادست، نسبت عمق جریان به پهنای سرریز و شیب جداره جانبی سرریز بستگی دارد.

امروزه با پیشرفت در محاسبات کامپیوتری، از مدل‌های عددی در شبهه‌سازی جریان، به دلیل محدودیت‌ها و هزینه‌های بالای آزمایشگاه و نیز صرفه‌جویی در زمان استفاده می‌گردد. آیدین جریان سطحی آزاد بر روی سرریز جانبی را با استفاده از نرم افزار FLUENT شبهه‌سازی نمود و مدل‌های آشفتگی مختلف (Spalart-Allmaras, K- ϵ -Standard³, K- ϵ -RNG², K- ϵ -Realizable, k-

$$\bar{f}(r, t) = \int_D G(r, r', \Delta) f(r', t) dV' \quad (3)$$

در معادله‌ی (۳) مکانی است که \bar{f} تعیین می‌شود و r' مکانی است که در انتگرال‌گیری مکانی در نظر گرفته می‌شود. Δ عرض فیلتر و G تابع فیلتراسیون می‌باشد.

کاربرد عملیات فیلتر در معادلات (۱) و (۲) منجر به مقادیر حل شده معادلات حاکم فیلتر شده در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به ترتیب برای معادله‌ی پیوستگی و معادله‌ی ناویراستوکس، به صورت زیر می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_r} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(g \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}^{SGS}}{\partial x_j} + g_i \frac{\bar{\rho} - \rho_r}{\rho_r} \quad (5)$$

عبارت غیرخطی $u_i u_j$ در معادلات ناویراستوکس (۱) به مقادیر فیلتر شده $\bar{u}_i \bar{u}_j$ در عبارت جابه‌جایی تبدیل می‌شود. معادله‌ی (۶) تنش مقیاس زیرشبکه‌ای است و بیان‌کننده اثر مولفه‌های سرعت مقیاس هاس کوچک (که باید مدل شوند) بر روی مولفه‌های سرعت مقیاس بزرگ (قابل حل هستند) می‌باشد و باید مدل شود.

$$\tau_{ij}^{SGS} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (6)$$

τ_{ij}^{SGS} تنها برای تاثیر حرکت مقیاس کوچک محاسبه می‌شوند. به طور کلی، تانسور تنش مقیاس زیرشبکه τ_{ij}^{SGS} به دو مولفه‌ی همسانگرد $\frac{1}{3} \tau_{kk}^{SGS} \delta_{ij}$ و ناهمسانگرد τ_{ij} به صورت زیر تقسیم می‌شود:

$$\tau_{ij}^{SGS} = \tau_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk}^{SGS} \delta_{ij} \quad (7)$$

در رابطه‌ی (۷) τ_{ij}^{SGS} جمع تنش‌های نرمال SGS و δ_{ij} تابع دلتای کرانکر می‌باشد و این تنش‌ها نیاز دارند تا توسط مدل مقیاس زیر شبکه مدلسازی شوند (Rodi et al., 2013).

مدل اسماگورینسکی-لیلی (SM)

اسماگورینسکی اولین پژوهشگری بود که مدلی را برای تنش‌های SGS ارائه کرد (Smagorinsky, 1963). مدل اسماگورینسکی همانند اکثر مدل‌های زیرشبکه‌ای موجود، از مفهوم لزجت گردابه‌ای و از فرضیاتی مانند فرضیات معادله‌ی بوزینسک استفاده می‌کند. در این مدل فرض می‌شود که بخش غیرایزوتروپیک تانسور تنش زیرشبکه‌ای، متناسب با تانسور نرخ کرنش حل شده می‌باشد. در نتیجه

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

بقای مومنتوم: معادلات ناویراستوکس

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho_r} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + g_i \frac{\rho - \rho_r}{\rho_r} \quad (2)$$

که u_i مولفه‌ی سرعت لحظه‌ای در جهت x_i ، P فشار استاتیکی لحظه‌ای، g ویسکوزیته‌ی سینماتیک، ρ_r چگالی مرجع و g_i شتاب گرانشی در جهت x_i می‌باشد. در این معادلات از تقریب بوزینسک استفاده شده است (Rodi et al., 2013). جزئیات بیشتر در کتاب ورستیگ و مالالاسکرا ارائه شده است (Versteeg and Malalasekera, 2007)

مدل‌های آشفتگی

از بین مدل‌های آشفتگی موجود برای حل میدان جریان، روش متوسط‌گیری زمانی رینولدز و نیز مدل‌های مقیاس زیر شبکه در روش شبیه‌سازی گردابه بزرگ در نظر گرفته شد که به لحاظ هزینه‌ی محاسباتی بین روش شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) و روش متوسط‌گیری زمانی رینولدز می‌باشد. در این روش حرکت‌های بزرگ مقیاس به طور مستقیم حل شده و حرکت‌های با مقیاس کوچک‌تر از اندازه‌ی شبکه، متوسط‌گیری مکانی می‌شوند و اثر آنها توسط یک مدل مقیاس زیرشبکه‌ای (مدل SGS) در نظر گرفته می‌شود. اما در مدل‌های RANS تمام طیف‌های حرکت جریان آشفتخته حل عددی می‌شود. در این پژوهش از مدل‌های مبتنی بر متوسط‌گیری زمانی رینولدز که شامل مدل‌های دومعادله‌ای k-ε در سه حالت Standard, RNG, Realizable و مدل دومعادله‌ای k-ω در حالت Standard و از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با کاربرد انواع مدل‌های مقیاس زیرشبکه‌ای شامل مدل اسماگورینسکی-لیلی^۸ (SM)، مدل دینامیکی اسماگورینسکی-لیلی^۹ (DSM)، مدل تنظیم لزجت گردابه‌ای موضعی متناسب با دیواره^{۱۱} (WALE)، مدل LES با مدلسازی جبری دیواره^{۱۱} (WMLES)، مدل جبری WMLES-S-OMEGA و مدل انرژی جنبشی دینامیکی مقیاس زیرشبکه^{۱۲} (DKE) استفاده شده است.

بر خلاف معادلات متوسط‌گیری زمانی رینولدز که میانگین‌گیری از متغیرها را بر روی زمان انجام می‌دهد، در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ میانگین‌گیری بر روی مکان انجام می‌گیرد که به میانگین‌گیری مکانی فیلتر کردن می‌گویند. بنابراین مبنای فرمول‌بندی روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، استفاده از روابط فیلترگیری جهت فیلتر نمودن معادلات حاکم می‌باشد. یک متغیر فیلتر شده که با یک خط بر روی آن نمایش داده می‌شود به صورت زیر قابل تعریف است:

است که در ادامه هر یک شرح داده خواهد شد.

مدل دینامیکی اسماکورینسکی - لیلی (DSM)

ژرمانو و همکاران روشی را پیشنهاد کردند که در آن ثابت مدل اسماکورینسکی C_s ، به طور دینامیکی بر اساس اطلاعات به دست آمده از کوچک‌ترین مقیاس‌های حل شده به ویژه در نزدیکی مرز محاسبه شود (Germano et al., 1996). در روش دینامیکی، فیلتر دومی که فیلتر آزمون نامیده می‌شود در معادلات حرکت به کار برده می‌شود. عرض فیلتر جدید $\tilde{\Delta}$ دو برابر عرض فیلتر شبکه Δ می‌باشد. هر دو فیلتر میدان جریان حل شده تولید می‌کنند. تفاوت بین دو میدان حل شده، توزیع مقیاس‌های کوچکی است که اندازه‌ی آن بین فیلتر شبکه و فیلتر آزمون است. اطلاعات مربوط به این مقیاس‌ها برای محاسبه‌ی ثابت مدل استفاده می‌شود. C_s به دست آمده با استفاده مدل دینامیکی اسماکورینسکی-لیلی با زمان و مکان در یک محدوده‌ی وسیعی تغییر می‌نماید. در نرم‌افزار ANSYS Fluent به طور پیش فرض در محدوده‌ی $C_s = 0 - 0.23$ در نظر گرفته شده است (FLUENT, 2015) یک مزیت روش دینامیکی مدل اسماکورینسکی (DSM) این است که رفتار μ_t را نزدیکی سطوح صلب به درستی و بدون نیاز به توابع میرایی تجربی پیش‌بینی می‌کند علاوه بر این روش DSM مقادیر صفر μ_t را در جریان آرام پیش‌بینی می‌نماید، و به تصحیح خاصی برای در نظر گرفتن اثرات چرخشی و لایه‌بندی نیازی ندارد (Rodi et al., 2013).

مدل تنظیم لزجت گردابه‌ای موضعی متناسب با دیواره (WALE)

نیکود و داکراس یک مدل ویسکوزیته گردابی نسبتاً ساده به نام مدل WALE ارائه کردند که می‌تواند بدون استفاده از توابع دیواره میرایی، اثر دیواره را به حساب آورد. ایشان پیشنهاد کردند که با استفاده از اطلاعات تانسور گرادیان سرعت حل شده $\bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ ، ویسکوزیته گردابی محاسبه شود. در مدل WALE، ویسکوزیته گردابی به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود (Nicoud and Ducros, 1999):

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/2}} \quad (13)$$

که در مدل WALE L_s و S_{ij}^d به صورت زیر تعریف می‌شود:

τ_{ij} به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\tau_{ij} = 2 \frac{\mu_t}{\rho} \bar{S}_{ij} \quad (8)$$

که در آن \bar{S}_{ij} نرخ کرنش حل شده می‌باشد و به صورت معادله‌ی (۹) توصیف می‌گردد:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

در مدل اسماکورینسکی-لیلی، ویسکوزیته گردابی به صورت زیر مدل می‌شود:

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (10)$$

که L_s طول اختلاط برای مقیاس‌های زیرشبکه و $|\bar{S}| \equiv \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$ می‌باشد. در نرم‌افزار ANSYS FLUENT، L_s به صورت زیر به دست می‌آید (FLUENT, 2015):

$$L_s = \min(\kappa d, C_s \Delta) \quad (11)$$

که K ثابت ون کارمن، d فاصله تا نزدیک‌ترین دیواره، C_s ثابت اسماکورینسکی و Δ بر طبق حجم سلول محاسباتی و با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta = V^{1/3} \quad (12)$$

ضریب اسماکورینسکی یک ضریب تجربی است و وابسته به هندسه و خصوصیات جریان می‌باشد. در شبهه‌سازی‌ها $C_s = 0.1$ در نظر گرفته شده است.

بارزترین ویژگی این مدل سادگی و سهولت کاربرد آن است. مهم‌ترین نقطه ضعف آن این است که C_s یک ثابت عمومی نیست. با این وجود مقادیر $C_s \approx 0.1$ بهترین نتایج را برای یک محدوده‌ی وسیعی از جریان‌ها، تولید می‌نماید که در نرم‌افزار ANSYS Fluent به صورت پیش فرض در نظر گرفته شده است (FLUENT, 2015). نقطه ضعف دیگر مدل اسماکورینسکی-لیلی این است که μ_t در زیرلایه‌ی لزج به صفر کاهش نمی‌یابد تا نوسان‌های آشفتگی در نزدیکی سطوح نفوذ ناپذیر مثل دیواره میرا شود. زیرا گرادیان‌های بزرگ سرعت در لایه‌ی مرزی حاکم هستند و در مقادیر بالای نرخ کرنش \bar{S} نتیجه می‌دهند. از این رو، لزجت گردابی آشفتگی μ_t ، نیاز دارد که در نزدیکی سطوح نفوذ ناپذیر توسط یک تابع نوسانی، میرا گردد. پس از آن اصلاحاتی بر روی مدل اسماکورینسکی انجام شد و توابع میرا کننده برای کاهش نرخ اتلاف نزدیک دیواره پیشنهاد شد که همگی در راستای کاهش معایب مدل اسماکورینسکی بودند (Rodi et al., 2013). بنابراین چندین مدل لزجت گردابه‌ای اصلاح شده برای کاهش نواقص مدل کلاسیک اسماکورینسکی پیشنهاد شده

هیبرید به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$v_i = \min \left[(\kappa d_w)^2, (C_{smag} \Delta)^2 \right] \times S \times \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{y^+}{25} \right)^3 \right] \right\} \quad (16)$$

که d_w فاصله دیوار، S نرخ کرنش، $\kappa = 0.41$ و $C_{smag} = 0.2$ ثابت‌ها هستند، و y^+ مقیاس عمود بر دیواره‌ی داخلی می‌باشد. مدل LES بر اساس مقیاس شبکه تعدیل یافته می‌باشد تا برای شبکه‌ی غیرایزوتروپیک در جریان‌های مدلسازی دیواره به حساب آید:

$$\Delta = \min \left(\begin{matrix} \max (C_w \cdot d_w; C_w \cdot h_{max}, h_{wn}) \\ ; h_{max} \end{matrix} \right) \quad (17)$$

که h_{max} ماکزیمم طول لبه برای سلول شش وجهی مستقیم‌الخط (برای انواع سلول و یا شرایط بسط این قانون استفاده می‌شود). h_{wn} فاصله شبکه عمود بر دیواره، و $C_w = 0.15$ ثابت می‌باشد.

مدل WMLES-S-OMEGA

یکی از موارد ناکارآمدی روش WMLES این است که زمانی که از مدل تعدیل یافته اسماکورینسکی استفاده می‌شود، ویسکوزیته‌ی گردابی صفر را برای جریان‌های برشی ثابت فراهم نمی‌کند (جریان‌های برشی به جریان‌هایی گفته می‌شود که دارای گرادیان سرعت هستند و در آن‌ها سرعت تابعی از ارتفاع می‌باشد). به همین دلیل، مدل WMLES اجازه محاسبه اثرات گذرا (انتقالی) را نمی‌دهد، و تنها می‌تواند ویسکوزیته‌گردابی بزرگ را در لایه‌های برشی جداکننده تولید نماید. یک راه برای کمک به فرمول‌بندی WMLES داده شده در معادله (۱۷)، محاسبه بخش LES مدل با استفاده از تفاوت $abs(S - \Omega)$ به جای S می‌باشد که S نرخ کرنش و Ω اندازه حالت گردابی (ورتیسیته) می‌باشد. این افزایش مربوط به فرمول‌بندی $WMLES - S - \Omega$ می‌شود (FLUENT, 2015).

مدل انرژی جنبشی دینامیکی مقیاس زیر شبکه

مدل‌های اصلی و دینامیکی اسماکورینسکی-لیلی، اساساً مدل‌های جبری هستند که تنش‌های مقیاس زیرشبکه با استفاده از مقیاس‌های سرعت حل شده پارامتری می‌شوند. فرض اساسی، تعادل محلی بین انرژی انتقال یافته از مقیاس فیلتر شبکه و اتلاف انرژی جنبشی در مقیاس‌های زیرشبکه کوچک می‌باشد. آشفتگی مقیاس زیرشبکه با منظور کردن انتقال انرژی جنبشی آشفتگی مقیاس

$$L_s = \min \left(\kappa d, C_w V^{\frac{1}{3}} \right) \quad (14)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ij}^2) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2, \quad (15)$$

$$\bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$$

ثابت WALE در نرم‌افزار ANSYS Fluent برابر با $C_w = 0.325$ می‌باشد. بقیه نمادها مشابه مدل اسماکورینسکی-لیلی می‌باشد (FLUENT, 2015). از مزایای مدل WALE می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف) پیش‌بینی درست رفتار ویسکوزیته‌ی گردابی در نزدیک سطوح صلب

ب) این مدل برای هندسه‌های پیچیده با شبکه‌های با ساختار و بدون ساختار مناسب می‌باشد. زیرا برخلاف روش دینامیکی، هیچ فیلترینگ صریح مرتبط با معرفی یک فیلتر آزمون لازم نیست.

ج) این مدل بر خلاف مدل اسماکورینسکی-لیلی (که مقدار غیرصفر را برای ویسکوزیته گردابی در جریان آرام تولید می‌نماید)، با استفاده از یک ضریب ثابت، مقدار صفر را برای ویسکوزیته گردابی u_i در جریان برشی آرام (مخصوصاً در مورد جریان آرام دیواره مرزی)، پیش‌بینی می‌کند (Rodi et al., 2013).

مدل LES با مدلسازی جبری دیواره (WMLES)

استفاده از روش LES، تنها برای جریان‌هایی که لایه‌های مرزی دیواره نیاز به حل ندارند، یا جریان‌هایی با اعداد رینولدز کم که لایه‌های مرزی آن‌ها آرام هستند، پیشنهاد می‌شود. اما چنین جریان‌های بسیار کم هستند و لازم است از شیوه‌های دیگری استفاده شود. یک روش نوید بخش برای فایق آمدن بر محدودیت‌های مقیاس عدد رینولدز LES، مدلسازی جبری دیواره LES یا (WMLES) می‌باشد. در روش WMLES بخش RANS مدل تنها در بخش‌های داخلی لایه‌ی لگاریتمی فعال می‌شود و بخش‌های بیرونی لایه‌ی مرزی توسط فرمول‌بندی تعدیل یافته‌ی LES پوشش داده می‌شود. چون بخش داخلی لایه‌ی مرزی مسئول عدد رینولدز وابسته به مدل LES است، روش WMLES می‌تواند در همان کیفیت شبکه برای هر افزایش عدد رینولدز برای شبیه‌سازی‌های جریان در کانال به کار برده شود.

فرمول‌بندی اصلی جبری روش WMLES توسط شوار و همکاران پیشنهاد شد (Shur et al., 2008). این روش مدل طول اختلاط را با یک مدل اصلاح شده اسماکورینسکی و با تابع میرایی دیواره پایملی ترکیب می‌کند (Piomelli et al., 1988). در این مدل ویسکوزیته‌ی گردابی با استفاده از یک مقیاس طول

سیال (VOF) جریان با سطح آزاد مدلسازی گردید. هم‌چنین برای ترکیب فشار-سرعت الگوریتم PISO، برای گسسته‌سازی فشار طرح PRESTO، برای گسسته‌سازی مومنتوم روش Power Law، برای گسسته‌سازی عبارت‌های انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ استهلاک آشفتگی روش Power Law انتخاب شد. هم‌چنین گام زمانی به صورت متغیر و حد مجاز خطاهای پیوستگی و اندازه حرکت مقدار ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد.

برای استخراج مقادیر درست داده‌های یک مدل عددی یا آزمایشگاهی، رسیدن جریان به یک حالت پایدار ضروری است. بنابراین به منظور کنترل ماندگار شدن جریان در مدل عددی دو معیار مد نظر قرار گرفت، اول اینکه دبی ورودی به مدل و خروجی از آن برابر شوند و دوم اینکه تغییرات پروفیل سطح آب نسبت به زمان ناچیز باشد. در این پژوهش عموماً در بازه‌ی زمانی یک تا دو دقیقه جریان به حالت ماندگار می‌رسید که در روش LES زمان شبهه‌سازی نسبت به مدل‌های مبتنی بر RANS بیشتر بوده است. در ضمن این شبهه‌سازی در آزمایشگاه محاسبات سنگین دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.

هندسه جریان و شبکه‌ی محاسباتی

در این تحقیق به منظور صحت سنجی مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی خامنه و همکاران که در گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت، استفاده شد (Khameneh et al., 2014). مدل آزمایشگاهی، یک کانال مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۵ متر می‌باشد که سرریز جانبی در ۵ متری از ابتدای کانال اصلی قرار دارد. شکل ۱ پلان سرریز جانبی کنگره‌ای را نشان می‌دهد. هم‌چنین برای درک بهتر هندسه مدل، نمایی از مدل آزمایشگاهی در شکل ۲ نشان داده شده است.

زیرشبکه، می‌تواند بهتر مدلسازی شود. کیم و منون مدل انرژی جنبشی مقیاس زیرشبکه دینامیکی را پیشنهاد کردند (kim and Menon, 1997).

تنش مقیاس زیر شبکه از معادله (۱۸) به دست می‌آید:

$$\tau_{ij}^{SGS} \equiv \rho \overline{u_i u_j} - \overline{\rho u_i u_j} \quad (18)$$

با ساده کردن معادله‌ی فوق انرژی جنبشی مقیاس زیر شبکه به صورت معادله‌ی (۱۹) حاصل می‌شود:

$$K_{SGS} = \frac{1}{2} (\overline{u_k^2} - \overline{u_k}^2) \quad (19)$$

ویسکوزیته گردابی مقیاس زیر شبکه، μ_t ؛ با استفاده از K_{SGS} به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = C_k \rho K_{SGS}^{\frac{1}{2}} \Delta_f \quad (20)$$

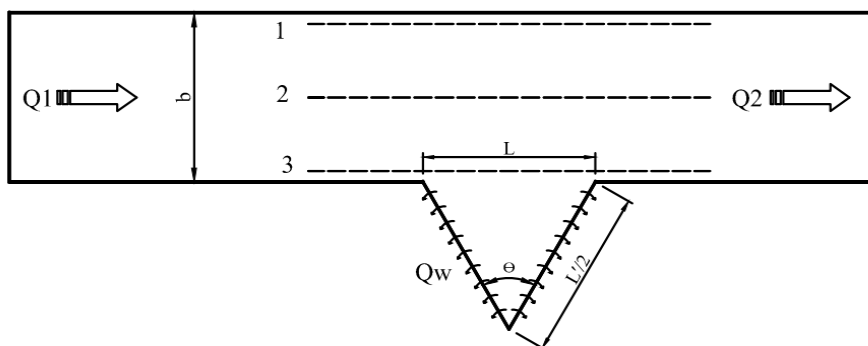
که Δ_f سایز فیلتر محاسبه شده از $\Delta_f \equiv V^{\frac{1}{3}}$ می‌باشد. تنش مقیاس زیر شبکه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\tau_{ij} - \frac{2}{3} \rho K_{SGS} \delta_{ij} = -2C_k \rho K_{SGS}^{\frac{1}{2}} \Delta_f \overline{S_{ij}} \quad (21)$$

با حل معادله انتقال حاصل می‌شود:

$$\rho \frac{\partial K_{SGS}}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_j K_{SGS}}{\partial x_j} = -\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_\epsilon \rho \frac{K_{SGS}^{\frac{3}{2}}}{\Delta_f} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K_{SGS}}{\partial x_j} \right) \quad (22)$$

در معادله فوق، σ_k تقریباً برابر یک بوده و ثابت‌های معادله، C_ϵ و C_k به طور دینامیکی تعیین می‌شوند (FLUENT, 2015). در این پژوهش از نرم افزار ANSYS Fluent 16 استفاده شده که برای حل معادلات پیوستگی و حرکت از روش حجم محدود بهره می‌برد. جریان به صورت غیرماندگار^{۱۳} و با استفاده از روش حجم



شکل ۱- پلان سرریز جانبی کنگره‌ای و محل‌های برداشت پروفیل سطح آب (محور ۱، ۲ و ۳)

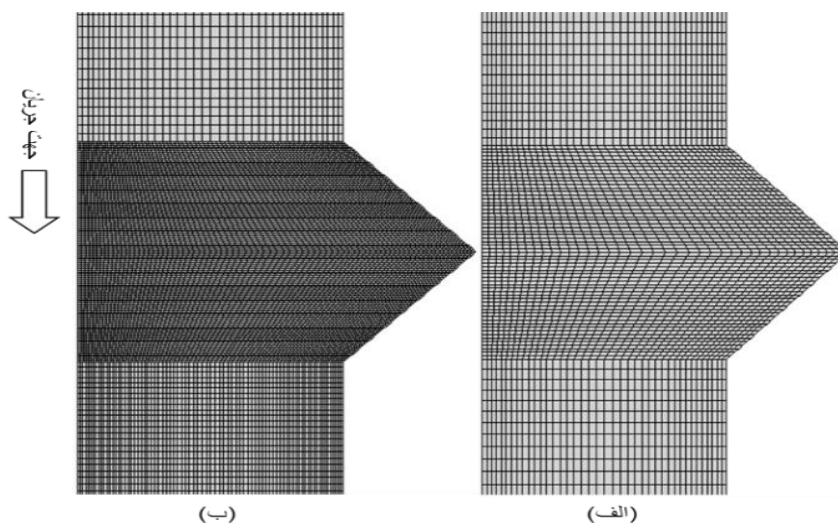


شکل ۲- نمونه‌ای مدل آزمایشگاهی سرریز جانبی کنگره‌ای (زاهدی خامنه، ۱۳۹۱)

یابد. به منظور بررسی استقلال از شبکه، چندین شبکه با سلول‌های متفاوت در یک شرایط مرزی و هندسی یکسان مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت. بنابراین برای به دست آوردن اثر شبکه محاسباتی بر شبیه‌سازی جریان، اندازه شبکه محاسباتی در چهار دسته شبکه محاسباتی درشت (۵۰۰ هزار سلول)، شبکه محاسباتی متوسط (۷۰۰ هزار سلول)، شبکه محاسباتی ریز (یک میلیون سلول) و شبکه محاسباتی بسیار ریز (دو میلیون سلول) در شرایط یکسان هندسی و هیدرولیکی در نظر گرفته شد و حساسیت‌سنجی شبکه تا رسیدن به نتایج ثابت و بدون تغییر انجام گردید. شکل ۳ دو نمونه از شبکه محاسباتی تولید شده با ۵۰۰ هزار و دو میلیون سلول را نشان می‌دهند.

سه حالت از آزمایش‌های انجام شده شامل سرریز جانبی کنگره‌ای با زوایای راس ۹۰، ۶۰ و ۴۵ درجه به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و بازشدگی ۳۰ سانتی‌متر به منظور شبیه‌سازی عددی انتخاب شد. در تمامی مدل‌ها عدد رینولدز در حدود ۴۴۰۰۰ و عدد فرود در محدوده $0.3 - 0.6$ می‌باشد.

هندسه و شبکه جریان در نرم‌افزار Gambit تولید شد. نوع شبکه به صورت شبکه سازمان یافته انتخاب گردید. هم‌چنین با توجه به حساسیت جریان در ناحیه سرریز جانبی و کانال اصلی پایین‌دست (به دلیل وجود ناحیه جدایش و منطقه‌ی ایستا و ایجاد گردابه)، در این نواحی تطبیق منطقه‌ای^{۱۴} انجام شد تا تعداد سلول‌های شبکه اولیه بر پایه هندسه و اطلاعات به دست آمده از حل عددی، افزایش یا کاهش

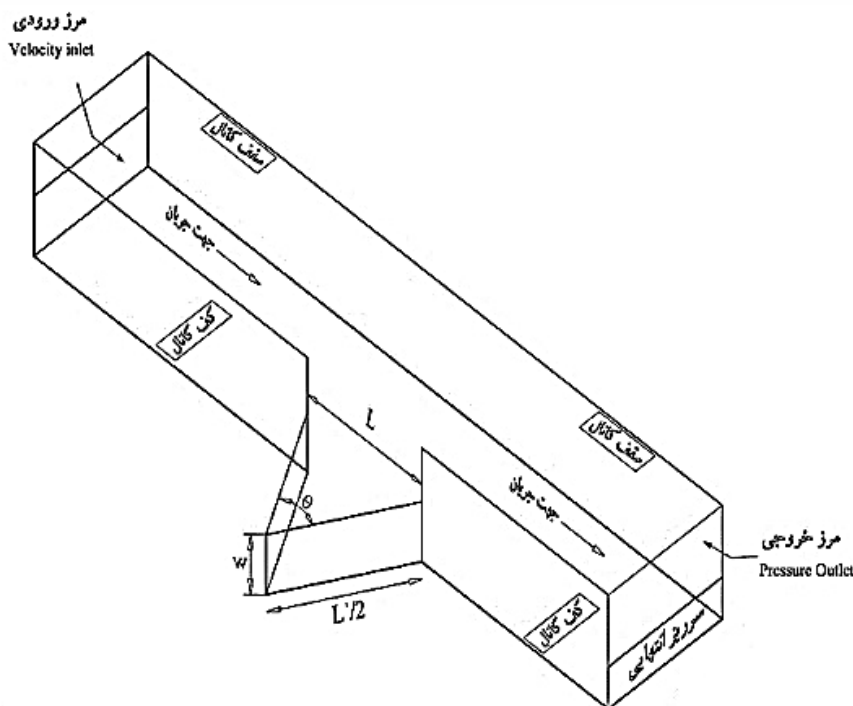


شکل ۳- اندازه‌ی شبکه محاسباتی در محدوده سرریز جانبی کنگره‌ای- (الف) ۵۰۳۲۰۰ سلول، (ب) ۲۰۱۲۴۰۰ سلول

مستطیلی لبه‌تیز در پایین دست کانال و شرایط فشار صفر بر روی این سرریز استفاده شد. بر روی سرریز جانبی شرط مرزی با فشار صفر و همچنین برای سقف کانال اصلی از شرط مرزی خروجی فشار با قرار دادن فشار صفر استفاده گردید. برای کف کانال و دیواره‌های کانال اصلی دیواره ثابت^{۱۷} انتخاب و در نهایت شرایط اولیه صفر برای تمامی مقادیر میدان محاسباتی اعمال شد. شکل ۴ هندسه و شرایط مرزی در شبه‌سازی جریان بر روی سرریز جانبی کنگره‌ای را نشان می‌دهد.

شرایط مرزی و شرایط اولیه

در ابتدای کانال بالادست، شرط مرزی سرعت ثابت در نظر گرفته شد. در شرط مرزی سرعت ثابت^{۱۵} یک بازشدگی به اندازه ارتفاع ورودی آب ایجاد گردیده و بالای این ورودی تا سقف کانال یک دیوار ایجاد شد. سرعت ورودی در این مقطع برابر سرعت متوسط جریان (مقادیر آزمایشگاهی) تنظیم گردید. در خروجی انتهای کانال اصلی از شرط مرزی خروجی فشار^{۱۶}، با قرار دادن یک سرریز انتهایی



شکل ۴- هندسه و شرایط مرزی در شبه‌سازی جریان بر روی سرریز جانبی کنگره‌ای

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{mes} - x_{cal})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{cal} - \bar{x}_{mes})^2} \quad (26)$$

که در آن x_{mes} یک داده مشاهده‌ای، x_{cal} یک داده محاسباتی و \bar{x}_{mes} میانگین داده‌های مشاهده‌ای است.

نتایج و بحث

در ابتدا اثر تعداد سلول‌های شبکه‌ی محاسباتی بر پروفیل سطح آب در نزدیکی سرریز جانبی (محور ۳) در شکل نشان داده شد.

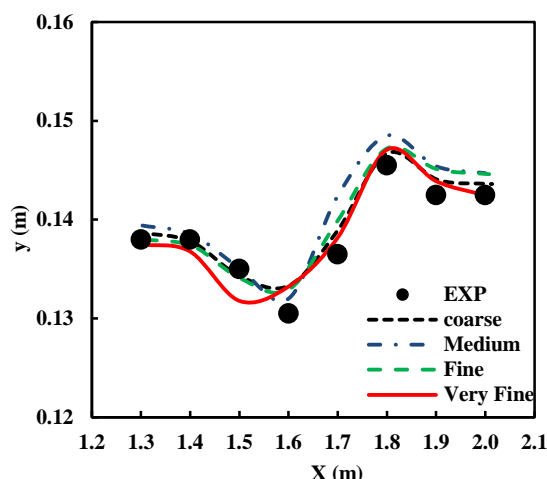
معیارهای بررسی صحت نتایج

به منظور تعیین میزان دقت روابط به دست آمده، از پارامترهای آماری درصد خطای نسبی (RE)، درصد متوسط خطای نسبی (MRE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، و ضریب همبستگی (R^2) استفاده شد.

$$RE = \frac{x_{mes} - x_{cal}}{x_{mes}} \times 100 \quad (23)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{x_{mes} - x_{cal}}{x_{mes}} \right| \times 100 \quad (24)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_{mes} - x_{cal})^2}{n}} \quad (25)$$



شکل ۵- اثر تعداد سلول‌های شبکه‌ی محاسباتی بر پروفیل سطح آب در مجاورت سرریز جانبی (محور شماره ۳)

زاویه‌ی راس ۹۰ درجه آورده شده است. برای بررسی نتایج مدل‌های عددی، مقادیر دبی و پروفیل سطح آب پیش‌بینی شده توسط مدل‌های آشفتگی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

ارزیابی مدل‌های آشفتگی RANS

با توجه به جدول ۱ مقادیر شبیه‌سازی شده به مقادیر آزمایشگاهی بسیار نزدیک است و تمامی مدل‌ها برآورد مناسبی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی می‌دهد. اما مدل Standard-k-ε نسبت به بقیه مدل‌ها، دارای خطای دبی و پروفیل سطح آب کمتری می‌باشد.

با توجه به شکل ۵، به ازای تمامی حالت‌ها، خطا بسیار کم، و پروفیل سطح آب نزدیک به شرایط آزمایشگاهی می‌باشد. با توجه به تغییرات کم در نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان به ازای اندازه شبکه‌های مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که حل معادلات مستقل از شبکه‌ی محاسباتی می‌باشد. اما نتایج حاصل از شبکه با تعداد سلول ۲ میلیون به بالا دقیق‌تر است. بنابراین شبکه بسیار ریز به عنوان بهترین شبکه برای انجام شبیه‌سازی به روش LES انتخاب شد. از آنجایی که نتایج هر سه سرریز با زوایای راس ۹۰، ۶۰ و ۴۵ درجه در بررسی مدل‌های آشفتگی مشابه می‌باشد، در این بخش تنها نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان بر روی سرریز جانبی کنگره‌ای با

جدول ۱- نتایج شبیه‌سازی مدل آرام و مدل‌های آشفتگی مبتنی بر RANS

مدل	Q1 (LS ⁻¹)	Q2 (LS ⁻¹)	QW (LS ⁻¹)	RE Q1 (%)	RE Q2 (%)	RE Qw (%)	R2	RE WSP* (%)
آزمایشگاهی	۲۰/۱۳	۱۳/۲۲۱	۶/۹۱۶	-	-	-	-	-
Laminar	۲۰/۱	۱۳/۱۱۲	۶/۹۸۷	۰/۱۷۹	۰/۸۱۸	-۱/۰۲۸	۰/۹۸	۰/۹۷۱
Standard-k-ε	۲۰/۱	۱۳/۲۳۳	۶/۸۶۶	۰/۱۷۹	-۰/۰۹۱	۰/۷۱۰	۰/۹۷	۰/۰۲۷
RNG-k-ε	۲۰/۱	۱۳/۰۲۶	۷/۰۷۳	۰/۱۷۹	۱/۴۶۹	-۲/۳۷۳	۰/۹۶	۱/۰۱۹
Realizable-k-ε	۲۰/۱	۱۲/۹۳۲	۷/۱۶۷	۰/۱۷۹	۲/۱۸۲	-۳/۶۳۷	۰/۹۶	۰/۹۳۸
k-ω	۲۰/۱	۱۳/۱۳۵	۶/۹۶۴	۰/۱۷۹	۰/۶۴۹	-۰/۷۰۶	۰/۹۷	۰/۴۳۳

* پروفیل سطح آب

زیر شبکه‌ی اسمگورینسکی-لیلی نزدیک به مدل دینامیکی می‌باشد. این امر ممکن است به این دلیل باشد که مقادیر محاسبه شده برای ضریب اسمگورینسکی (C_s) در مدل دینامیکی نزدیک به مقدار ثابت $C_s = 0.1$ در مدل اسمگورینسکی-لیلی است. اما با توجه به خطای نتایج دبی و پروفیل سطح آب، مدل مقیاس زیر شبکه

ارزیابی مدل‌های مختلف مقیاس زیر شبکه در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

با توجه به جداول ۲ و ۳ مقادیر شبیه‌سازی شده به مقادیر آزمایشگاهی بسیار نزدیک است و تمامی مدل‌ها برآورد مناسبی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی می‌دهد. از طرفی نتایج مدل مقیاس

اسماگورینسکی می‌تواند مدل مناسبی برای شبهه‌سازی جریان در پژوهش حاضر باشد.

اسماگورینسکی-لیلی به عنوان بهترین مدل مقیاس زیرشبکه انتخاب می‌شود. همچنین با توجه به پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی مهندسی هیدرولیک به نظر می‌رسد مدل مقیاس زیرشبکه‌ی

جدول ۲- نتایج شبهه‌سازی دبی جریان با مدل‌های مختلف مقیاس زیرشبکه در روش شبهه‌سازی گردابه‌های بزرگ

مدل	$Q_1 (LS^{-1})$	$Q_2 (LS^{-1})$	$Q_w (LS^{-1})$	RE Q_1 %	RE Q_2 %	RE Q_w %
آزمایشگاهی	۲۰/۱۳	۱۳/۲۲۱	۶/۹۱۶	-	-	-
SM	۲۰/۱	۱۲/۸۸۹	۷/۲۰۷	۰/۱۹۶	۲/۵۱۰	-۴/۲۱۳
DSM	۲۰/۱	۱۲/۸۳۶	۷/۲۵۹	۰/۱۹۶	۲/۹۰۴	-۴/۹۶۷
WALE	۲۰/۱	۱۲/۶۱۷	۷/۴۷۹	۰/۱۹۶	۲/۴۳۶	-۸/۱۴۲
WMLES	۲۰/۱	۱۲/۸۷۴	۷/۲۲۲	۰/۱۹۶	۲/۶۲۳	-۴/۴۲۹
WMLES-S- Ω	۲۰/۱	۱۲/۸۸۶	۷/۲۰۹	۰/۱۹۶	۲/۵۲۶	-۴/۲۴۵
DKE	۲۰/۱	۱۲/۷۲۸	۷/۳۶۸	۰/۱۹۶	۳/۷۲۶	-۶/۵۳۸

جدول ۳- نتایج اختلاف پروفیل سطح آب آزمایشگاهی با شبهه‌سازی شده با مدل‌های مختلف مقیاس زیرشبکه در روش شبهه‌سازی گردابه‌های بزرگ

مدل عددی	محور مجاور دیواره‌ی کانال			محور وسط کانال			محور مجاور سرریز جانبی		
	RMSE (m)	R ²	RE WSP (%)	RMSE (m)	R ²	RE WSP (%)	RMSE (m)	R ²	RE WSP (%)
SM	۰/۰۰۰۹	۰/۹۵	-۰/۴۶۲	۰/۰۰۱۳	۰/۹۸	-۰/۷۵۴	۰/۰۰۲۰	۰/۹۵	-۰/۹۵۲
DSM	۰/۰۰۱۱	۰/۹۵	-۰/۶۴۸	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹	-۰/۹۰۵	۰/۰۰۲۲	۰/۹۵	-۱/۰۶۲
WALE	۰/۰۰۱۳	۰/۷۹	-۰/۵۶۶	۰/۰۰۱۳	۰/۹۸	-۰/۸۴۹	۰/۰۰۲۹	۰/۸۷	-۱/۰۰۲
WMLES	۰/۰۰۱۴	۰/۸۱	-۰/۷۶۱	۰/۰۰۱۶	۰/۹۷	-۱/۰۲۵	۰/۰۰۲۰	۰/۹۷	-۱/۲۰۱
WMLES-S- Ω	۰/۰۰۱۹	۰/۸۹	-۱/۲۵۱	۰/۰۰۲	۰/۹۶	-۱/۴۳۱	۰/۰۰۲	۰/۹۸	-۱/۵۳۶
DKE	۰/۰۰۱۰	۰/۹۱	-۰/۵۸۰	۰/۰۰۱۵	۰/۹۹	۰/۸۴۳	۰/۰۰۲۹	۰/۸۹	-۱/۰۰۰

است اما خطای نسبی پروفیل سطح آب در روش k- ϵ -Standard اندکی کمتر از روش LES می‌باشد. این اختلاف اندک در دبی عبوری می‌تواند مرتبط با دقت روش اندازه‌گیری دبی در آزمایشگاه باشد که در انتخاب روش برتر موثر می‌باشد.

مقایسه روش شبهه‌سازی گردابه‌های بزرگ با مدل RANS با توجه به نتایج جدول ۴ مشاهده می‌شود که خطای نسبی دبی عبوری از روی سرریز جانبی در هر دو روش LES و روش k- ϵ -Standard تقریباً برابر می‌باشد. همچنین با توجه به جدول ۵، هر چند که مقادیر R² در روش LES نسبت به روش k- ϵ -Standard بیشتر

جدول ۴- نتایج شبهه‌سازی دبی جریان به روش شبهه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل آشفتگی RANS

مدل	$Q_1 (LS^{-1})$	$Q_2 (LS^{-1})$	$Q_w (LS^{-1})$	RE Q_1 %	RE Q_2 %	RE Q_w %
آزمایشگاهی	۲۰/۱۳	۱۳/۲۲۱	۶/۹۱۶	-	-	-
LES (Smagorinsky)	۲۰/۱	۱۲/۸۰۹	۷/۲۸۷	۰/۱۹۶	۳/۱۱۵	-۵/۳۷۰
RANS (Standard k- ϵ)	۲۰/۱	۱۲/۸۲۷	۷/۲۶۹	۰/۱۹۶	۲/۹۷۹	-۵/۱۱۰

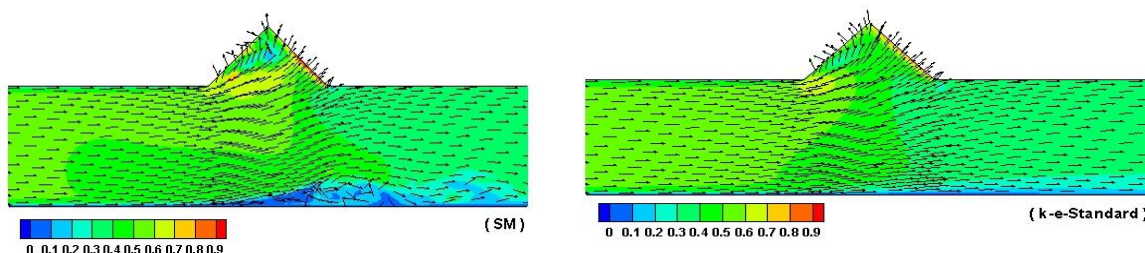
جدول ۵-مقایسه نتایج پروفیل سطح آب به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل آشفتگی RANS

مدل عددی	محور مجاور دیواره‌ی کانال			محور وسط کانال			محور مجاور سرریز جانبی		
	RMSE (m)	R ²	RE WSP (%)	RMSE (m)	R ²	RE WSP (%)	RMSE (m)	R ²	RE WSP (%)
LES (Smagorinsky)	۰/۰۰۰۹	۰/۹۵	-۰/۴۶۱	۰/۰۰۱	۰/۹۸	-۰/۷۵۴	۰/۰۰۲	۰/۹۵	-۰/۹۵۲
RANS (Standard k-ε)	۰/۰۰۱	۰/۹۱	۰/۱۷۴	۰/۰۰۱	۰/۹۶	-۰/۱۷۰	۰/۰۰۲	۰/۸۶	-۰/۲۵۹

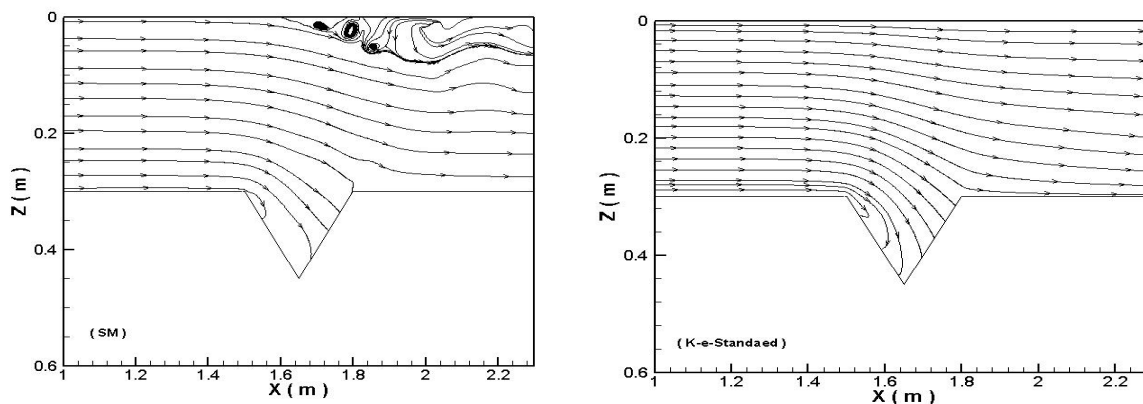
است) و مدل K-ε-Standard مشاهده می‌شود که روش LES توانایی بالایی در ارائه جزئیات جریان آشفته به ویژه در نواحی جدایش جریان و ایستا دارد. اما مدل K-ε-Standard نتوانسته است ناحیه ایستا را در مجاورت دیوار سمت راست کانال اصلی به خوبی نشان دهد. بر طبق نتایج آیدین و امیراغلو خطوط هم سرعت در نزدیکی دیواره سمت راست کانال اصلی ناحیه ایستا را نشان می‌دهد، اما بردارهای سرعت رسم شده در مدل، ناحیه ایستا را نشان نمی‌دهد (Aydin and Emiroglu, 2013). بنابراین مدل RANS نسبت به مدل‌های مقیاس زیرشبکه در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در ارائه‌ی ماهیت واقعی جریان آشفته ضعیف‌تر عمل می‌نماید. از آنجایی‌که در ارائه‌ی مدل LES گردابه‌های بزرگ مقیاس به صورت مستقیم حل می‌شوند، انتظار می‌رفت که این مدل برای جریان‌های حاوی گردابه‌ها دقیق‌تر و معتبرتر رفتار کند.

بررسی خطوط جریان و پروفیل سرعت

با توجه به شکل ۶ در مجاورت دیوار سمت راست کانال اصلی سرعت جریان به صفر کاهش می‌یابد که سبب تشکیل ناحیه ایستا و نیز ناحیه‌ی جدایش می‌شود که علت آن را می‌توان گردابیان فشار عرضی و مکش اعمالی از طرف جریان عبوری از روی سرریز جانبی دانست. بنابراین در بررسی الگوی برداری سرعت شبیه‌سازی شده می‌توان به ایجاد جریان ثانویه در کانال اصلی، در اثر وجود سرریز جانبی اشاره نمود. نیری و همکاران نیز در بررسی‌های خود در مورد جریان در آبگیر جانبی، به وجود جریان‌های ثانویه در راستای طولی کانال اصلی اشاره کرده‌اند (Neary et al., 1999). شکل ۷ خطوط جریان را در فاصله‌ی ۱۰ میلی‌متری بالای تاج سرریز به ازای مدل مقیاس زیرشبکه‌ی اسماکورینسکی در روش LES و مدل RANS نشان می‌دهد. با مقایسه مدل‌های مختلف مقیاس زیرشبکه در روش LES (که در اشکال ۶ و ۷ تنها مدل اسماکورینسکی آورده شده



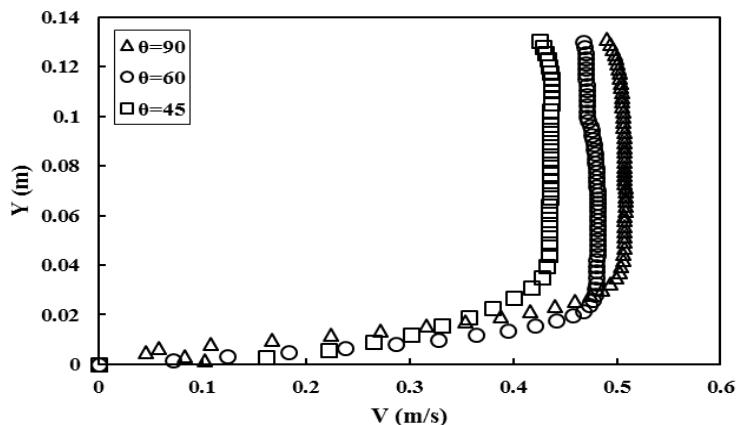
شکل ۶- بردارهای سرعت و توزیع سرعت در فاصله‌ی ۱۰ میلی‌متری بالای تاج سرریز به ازای مدل مقیاس زیرشبکه‌ی اسماکورینسکی در روش LES و مدل RANS



شکل ۷- نمایش خطوط جریان در فاصله‌ی ۱۰ میلی‌متری بالای تاج سرریز به ازای مدل مقیاس زیرشبکه‌ی اسماکورینسکی در روش LES و مدل RANS

می‌شود با افزایش زاویه راس سرریز جانبی کنگره‌ای طول موثر سرریز کاهش می‌یابد در نتیجه مقادیر سرعت افزایش می‌یابد.

در شکل ۸ پروفیل سرعت در خطی در مرکز سرریز جانبی کنگره‌ای در وسط کانال اصلی از کف تا سطح آب برای سرریزهای ۹۰، ۶۰ و ۴۵ درجه، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده

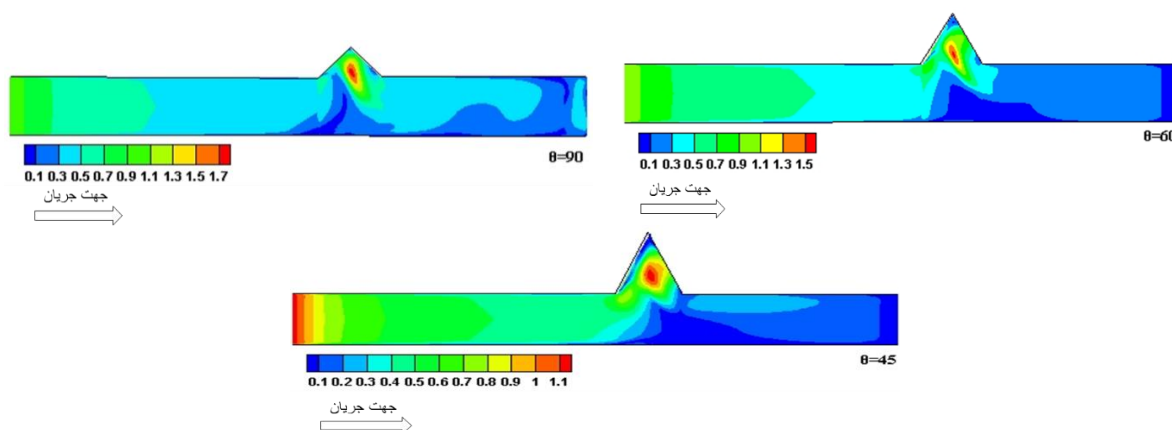


شکل ۸- پروفیل سرعت در وسط کانال در خط مرکزی سرریز جانبی کنگره‌ای

میزان تنش برشی رخ داده است. پس در این ناحیه به علت بالا بودن تنش برشی احتمال آبشستگی بستر کانال افزایش می‌یابد. از طرفی با مقایسه توزیع تنش برشی بستر کانال در سه زاویه‌ی راس سرریز کنگره‌ای ۹۰، ۶۰ و ۴۵ مشخص می‌شود که با افزایش زاویه راس سرریز میزان تنش برشی وارد بر کف افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند به علت افزایش سرعت در سرریزها با افزایش زاویه‌ی راس سرریز و کاهش طول موثر سرریز باشد (شکل ۸).

تنش برشی

در شکل ۹ الگوی تنش برشی کل در تراز بستر برای کانال اصلی دارای سرریز جانبی کنگره‌ای با سه زاویه‌ی راس ۹۰، ۶۰ و ۴۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹ در نزدیکی دیواره سمت راست و چپ کانال اصلی در پایین دست سرریز جانبی، تنش برشی کمترین مقدار را داراست. بنابراین می‌توان بیان کرد که با توجه به میزان تنش برشی کم، امکان رسوب‌گذاری در مجاورت دیواره‌های کانال اصلی وجود دارد. هم‌چنین در نواحی داخلی سرریز جانبی کنگره‌ای بیشترین



شکل ۹- توزیع تنش برشی کل بر حسب پاسکال (Pa) در بستر برای کانال اصلی دارای سرریز جانبی کنگره‌ای با سه زاویه‌ی راس ۹۰، ۶۰ و ۴۵ درجه

کنگره‌ای، شبیه‌سازی عددی جریان با استفاده از مدل‌های مختلف مقیاس زیرشبکه‌ای در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل‌های

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از نتایج آزمایشگاهی سرریز جانبی

آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد. هر چند پروفیل سطح آب به دست آمده از مدل مبتنی بر RANS نسبت به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ از دقت بالاتری برخوردار است اما روش LES در پیش‌بینی جزئیات رفتار هیدرولیکی جریان آشفته بسیار قدرتمند عمل می‌کند.

مبتنی بر RANS انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:
 ۱- نتایج به دست آمده از مدل اسماکورینسکی- لیلی نسبت به دیگر مدل‌های مقیاس زیر شبکه‌ای در روش LES مطابقت بیشتری با نتایج مدل آزمایشگاهی داشت.
 ۲- نتایج هر دو روش LES و مدل مبتنی بر RANS با مقادیر

پی‌نوشت

Reynolds Stress Model (RMS)	مدل تنش رینولدز
Re-Normalisation Group (RNG)	گروه نرمال شده
K-ε-Standard	مدل K-ε استاندارد
(VOF) Volume of fluid	روش حجم سیال
(LES) Large Eddy Simulation	روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ
Subgrid-Scale (SGS) model	مدل‌های مقیاس زیر شبکه‌ای
Reynolds Average Navier-Stokes Models (RANS)	مدل‌های مبتنی بر متوسط گیری زمانی رینولدز
Smagorinsky-Lilly Model	مدل اسماکورینسکی- لیلی
Dynamic Smagorinsky-Lilly Model	مدل دینامیکی اسماکورینسکی- لیلی
Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (WALE) Model	مدل تنظیم لزجت گردابه‌ای موضعی متناسب با دیواره
Algebraic Wall-Modeled LES Model (WMLES)	مدل LES با مدل‌سازی جبری دیواره
Dynamic Kinetic Energy Subgrid-Scale Model	مدل انرژی جنبشی دینامیکی مقیاس زیر شبکه
Unsteady	غیرماندگار
Adapt Region	تطبیق منطقه‌ای
Velocity inlet	سرعت ثابت
Pressure Outlet	خروجی فشار
Wall	دیواره ثابت

سابق (۲۰۰۷: ۱-۱۲)

منابع

- ACKERS, P., COLEMAN, SMITH and BERNOULLI, 1957. A THEORETICAL CONSIDERATION OF SIDE WEIRS AS STORMWATER OVERFLOWS. HYDRAULICS PAPER NO 11. SYMPOSIUM OF FOUR PAPERS ON SIDE SPILLWAYS. Proceedings of the institution of Civil Engineers, 6.2:250-269.
- Aydin, M.C. and Emiroglu, M.E., 2013. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. Flow Measurement and Instrumentation, 29:1-8.
- Aydin, M.C., 2012. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. Advances in Engineering Software, 45.1:159-166.
- Bremen, R. and Hager, W.H., 1989. Experiments in side-channel spillways. Journal of hydraulic Engineering, 115.5:617-635.
- De Marchi, G., 1934. Essay on the performance of lateral weirs. L'Energia Elettrica, Milan, Italy, 11:849-860.
- اسمعیل پور، ل، فرسادی زاده، د. و حسین زاده دلیر، ع. ۱۳۹۵. بررسی مشخصات هیدرولیکی سرریز جانبی کنگره‌ای نیم‌دایره‌ای یک طرفه. مجله دانش آب و خاک، ۲۶: ۱۸۷-۱۹۵
- زاهدی خامنه، ح. ۱۳۹۱. مطالعه تاثیر تغییر هندسه سرریز و افزایش تعداد سیکل بر ضریب تخلیه سرریزهای جانبی منقاره‌ای و نیم‌دایره‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- نکویی، م. ع. ۱۳۸۵. بررسی و تعیین ضریب دبی سرریز جانبی منقاری به صورت آزمایشگاهی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- ولایتی، ف.، وطن خواه محمد آبادی، ع. ر. ۱۳۹۸. محاسبه بده سرریز جانبی لبه پهن دوزنقه‌ای در رژیم جریان زیر بحرانی بر اساس تئوری جریان متغیر مکانی. مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی (تحقیقات مهندسی کشاورزی

- Combustion. 62.3:183–20.,
- Piomelli, U., Moin, P. and Ferziger, J.H., 1988. Model consistency in large eddy simulation of turbulent channel flows. *The Physics of fluids*, 31.7:1884-1891.
- Rodi, W., Constantinescu, G. and Stoesser, T., 2013. *Large-eddy simulation in hydraulics*. Crc Press.
- Shur, M.L., Spalart, P.R., Strelets, M.K. and Travin, A.K., 2008. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29.6:1638-1649.
- Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly weather review*, 91.3:99-164.
- Subramanya, K. and Awasthy, S.C., 1972. Spatially varied flow over side-weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, 98.1:1-10.
- Vatankhah, A.R., 2011. Direct integration of gradually varied flow equation in parabolic channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22.3:235-241.
- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 2007. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education.
- Zahedi Khameneh HZ, Khodashenas SR and Esmaili K, 2014. The Effect of Semi-circular side weirs on hydraulic properties and discharge coefficient of side weirs. *Journal of River Engineering* 25.52: 20-25.
- Ziaei, A.N., Nikou, N.S., Beyhaghi, A., Attarzadeh, F. and Khodashenas, S.R., 2019. Flow simulation over a triangular labyrinth side weir in a rectangular channel. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 19.1:22-34
- El-Khashab, A. and Smith, K.V., 1976. Experimental investigation of flow over side weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, 102.9:1255-1268.
- Emiroglu, M.E., Kaya, N. and Agaccioglu, H., 2009. Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 136.1:37-46.
- FLUENT, A. 2015. 16.2 Theory Guide, release 16.2@ ANSYS. Inc. July.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W.H., 1991. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 3.7.1760-1765.
- Khalili, M. and Honar, T., 2017. Discharge coefficient of semi-circular labyrinth side weir in subcritical flow. *Water SA*, 43.3:433-441
- Khameneh HZ, Khodashenas SR and Esmaili K., 2014. The effect of increasing the number of cycles on the performance of labyrinth side weir. *Flow Measurement and Instrumentation* 39: 35-45.
- Kim, W.W., Menon, S., 1997, January. Application of the localized dynamic subgrid-scale model to turbulent wall-bounded flows. In 35th aerospace sciences meeting and exhibit.
- Kouchakzadeh, S., Vatankhah, A.R. and Townsend, R.D., 2001. A modified perturbation solution procedure for spatially-varied flows. *Canadian Water Resources Journal*, 26.3:399-416.
- Neary, V.S., Sotiropoulos, F. and Odgaard, A.J., 1999. Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125.2:126-140.
- Nicoud, F and Ducros, F. 1999. "Subgrid-Scale Stress Modelling Based on the Square of the Velocity Gradient Tensor.Flow". *Turbulence, and*

Numerical Modeling over a Labyrinth Side Weir Using Large Eddy Simulation method (LES)

F. Attarzadeh¹, S.R. Khodashenas^{2*}, A.N. Ziaei³
Recived: Jun.09, 2019 Accepted: Sep.17, 2019

Abstract

In this study, three-dimensional flow around the labyrinth side weir was simulated using a variety of Subgrid-Scale (SGS) models in LES method and four turbulence models based on RANS method with different computational grid size in ANSYS Fluent software. The simulation and experimental results were compared. The predicted flow discharge and water surface profile were validated using experimental data and the proper Subgrid-Scale (SGS) model in LES method was selected for hydrodynamic and parametric studies and were compared with the proper turbulence models based on RANS. All numerical values are very close to experimental values. Although the predicted water surface profile by turbulence models based on RANS method (K-ε-Standard model) was better than of LES Method, but the results of the hydraulic analysis showed that all Subgrid-Scale (SGS) models in the LES method can be predicted the complex flow patterns and behaviors in more detail than turbulence models based on RANS method. As the result of flow discharge and water surface profile and also high relatively confidence in the ability of large Eddy Simulation method, the velocity, shear stress distribution and secondary flow channels with labyrinth side weir were investigated

Keywords: Labyrinth side weir, Large Eddy Simulation, Subgrid-Scale (SGS) models, Turbulence Modeling

1- Ph.D. Student in Water Structures, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

2- Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

3- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

(*- Corresponding Author Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)