مجله علمی- پژوهشی
دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۱

مدل‌سازی عددی جریان اطراف پایه‌های استوانه‌ای با استفاده از گام زمانی یک و دوگانه و روش‌های RANS و LES

یاسین آقایی شلمانی[1]، حبیب حکیم‌زاده[2*]
۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز
۲- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

[*] سهند، دانشگاه صنعتی سهند
hakimzadeh@sut.ac.ir

چکیده- در این مقاله جزئیات یک مدل عددی تهیه شده و نتایج مدل‌سازی جریان اطراف پایه‌های استوانه‌ای شکل ارائه می‌شود. معادلات حاکم بر جریان، معادلات ناویر- استوکس سه بعدی و معادله بقای جرم می‌باشد. گسسته‌سازی معادلات جریان با استفاده از روش حجم محدود با شبکه‌های متعامد انجام شده است. مدل‌سازی آشفتگی بر اساس دو روش متفاوت انجام شده است که عبارتند از مدل متوسط‌گیری شده زمانی ناویر- استوکسِ رینولدز RANS و مدل متوسط‌گیری شده در مکان یا شبیه‌سازی گردابه بزرگ LES. روش اصلی حل معادلات در این تحقیق روش تراکم‌پذیری مصنوعی با دو شیوه گام زمانی یگانه و دوگانه می‌باشد. گسسته‌سازی زمانی با توجه به نوع انتخاب روش گام زمانی به دو صورت ضمنی و صریح صورت گرفته است. نتایج مدل‌سازی حاضر با نتایج آزمایشگاهی جریان اطراف پایه‌های استوانه‌ای مقایسه شده است که نشان دهنده تأثیر نوع مدل‌سازی آشفتگی و شیوه گام زمانی انتخابی بر نتایج مدل‌سازی است.

کلیدواژگان: جریان، پایه استوانه‌ای، ناویر-استوکس، گام زمانی یگانه و دوگانه، آشفتگی.

۱- مقدمه

سازه‌های هیدرولیکی بسیاری در محیط‌های آبی استفاده می‌شوند. یکی از پر کاربردترین این سازه‌ها، پایه‌های استوانه‌ای شکل است. پایه پل یک نمونه از سازه‌هایی است که در مسیر جریان قرار گرفته و الگوی جریان در اطراف آن را تغییر می‌دهد. اگر پایه‌ای در برابر جریان آب وجود داشته باشد، گرادیان فشار دینامیکی در جلوی پایه، جریان رو به پایینی را در جلوی آن ایجاد می‌کند. جریان رو به پایین پس از برخورد به بستر در جهت‌های مختلف پراکنده می‌شود و بستر قابل فرسایش را نیز حفر می‌کند. مقداری از این جریان که به سمت بالادست بازگشت می‌کند، در برخورد با جریان اصلی رودخانه مجبور به حرکت در جهت جریان شده و مجدداً به پایه برخورد می‌کند و در داخل حفره ایجاد شده، گردابی را تشکیل می‌دهد. این گرداب در دو طرف پایه امتداد یافته و شکلی شبیه نعل اسب بوجود می‌آورد که پیچک نعل اسبی نامیده می‌شود. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داده است که گردابه‌های نعل اسبی نقش اصلی در آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌ها دارد (Dargahi, 1989).

پدیده آبشستگی اطراف سازه‌های هیدرولیکی و به ویژه

پایه‌های پل‌ها سالانه باعث از بین رفتن بسیاری از این سازه‌ها در سطح دنیا می‌شود. مطالعات فراوانی بصورت آزمایشگاهی و یا مطالعات موردی در زمینه بررسی جریان و در نتیجه آبشستگی پایه‌های پل انجام شده است (Dargahi, 1990; Melville and Cheiw, 1999; Sheppard et al., 2004; Lee and Sturm, 2009; Roulund et. al., 2005).
آبشستگی در اطراف پایه‌ها کاملاً در ارتباط با خصوصیات جریان و پارامترهای آشفتگی جریان است. حرکات آشفته جریان در اثر وجود پایه بسیار پیچیده بوده و این به علت سه بعدی بودن آشفتگی و تقریباً نامنظم بودن حرکت‌های آن می‌باشد. این حرکت‌ها شامل طیف عظیمی از اندازه گردابه‌ها می‌باشد. بررسی الگوی جریان در اطراف پایه استوانه‌ای و به خصوص آشفتگی جریان از مهمترین پارامترهای شناخت، مطالعه و در نتیجه کنترل آبشستگی در اطراف پایه‌ها می‌باشد. یکی از پرکاربردترین روش‌های مطالعه خصوصیات جریان و آشفتگی استفاده از روش‌های عددی می‌باشد. روش‌های متفاوتی برای مدل‌سازی جریان‌های آشفته وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش شبیه‌سازی عددی مستقیم DNS اشاره کرد. استفاده از این روش منحصر به جریان‌های با عدد رینولدز پایین است.

Yuhi et al. (1999) ،Gushchin et al. (2002) و Wissink and Rodi (2008) در مطالعاتی جداگانه به بررسی جریان اطراف پایه‌های استوانه‌ای شکل با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی مستقیم جریان پرداختند.

روش دیگر، روش متوسط‌گیری زمانی معادلات ناویر–استوکس RANS می‌باشد. RANS در مدل‌سازی جریان اطراف پایه‌های استوانه‌ای شکل به‌صورت گسترده بکار برده شده است (Majumdar and Rodi, 1989; Olsen and Melaaen, 1993; Salaheldin et al., 2004; Aghaee and Hakimzadeh, 2007; Zhao et al., 2010; Khosronejad et al., 2012).
یکی از روش‌های میانی بین DNS و روش RANS، روش متوسط‌گیری مکانی یا شبیه‌سازی گردابه بزرگ LES می‌باشد. در این روش مدل‌سازی جریان بر اساس ابعاد شبکه و متوسط‌گیری مکانی پارامترهای جریان بر روی شبکه می‌باشد. این روش نیاز به شبکه‌های بسیار ریز در مجاورت مرزهای جامد دارد. تعداد شبکه‌های مورد نیاز برای حل معمولاً از مرتبه 10^6 یا بالاتر است. البته نمونه‌هایی از مدل‌سازی با استفاده از این روش با تعداد شبکه‌های کمتر نیز موجود است (Tseng et al., 2000).
از جمله پرکاربردترین روش‌های شبیه‌سازی گردابه بزرگ می‌توان به روش اسماگورینسکی و روش‌های دینامیکی تعیین پارامتر آشفتگی اشاره کرد. روش اسماگورینسکی دارای کاربرد ساده و پایداری حل بسیار خوب می‌باشد اما تعیین و تنظیم پارامتر اسماگورینسکی تا اندازه‌ای مرتبط با نوع جریان می‌باشد (Cheng et al., 2003). روش دینامیکی تعیین پارامتر آشفتگی، نیازمند حل معادلات جدید و بکارگیری برخی از متوسط‌گیری‌های اضافی زمانی و مکانی برای پایدارسازی حل می‌باشد (Cheng et al., 2003).

استفاده از روش‌های مختلف مدل‌سازی آشفتگی منجر به نتایج نسبتا متفاوت در میدان جریان اطراف سازه‌های در معرض جریان خواهد شد. این تفاوت‌ها بعضا قابل صرف‌نظر است، اما در بسیاری از موارد نتایج کاملاً متفاوتی را ارائه می‌دهد (Cheng et al., 2003). مطالعات عددی متعددی در مورد مقایسه روش‌های مختلف مدل‌سازی آشفتگی در جریان اطراف پایه‌های استوانه‌ای شکل وجود دارد که می‌توان به Rodi (1997)، Cheng et al. (2003)، Benarafa et al. (2006) و Aghaee and Hakimzadeh (2010) اشاره کرد. با توجه به اهمیت پدیده آشفتگی و تأثیر آن بر الگوهای جریان، لازم است که در مدل‌سازی آشفتگی دقت زیادی صورت گیرد، چرا که با استفاده ناصحیح از مدل‌های آشفتگی در برخی از جریان‌ها نتایج گمراه‌کننده‌ای از جریان استخراج می‌شود.
معادلات ذکر شده برای جریان و آشفتگی توسط

روش‌های متفاوتی حل می‌شوند. این روش‌ها عموماً به صورت عددی و غیر تحلیلی می‌باشند. روش‌های حل متفاوتی توسط محققان ارائه شده است. مهمترین آنها روش کوپل معادلات سرعت و فشار است که تحت عنوان معادلات جریان و معادله فشار پواسون می‌باشد (Harlow and Welch, 1965). روش‌های دیگر با عنوان روش چند مرحله‌ای[1] (Chorin, 1968) و روش تراکم‌پذیری مصنوعی[2] (Chorin, 1967) می‌باشند. در اینجا باید اشاره شود که تقریباً برتری محسوسی بین روش‌های ذکر شده وجود ندارد (Kim and Menon, 1999)، اما به نظر می‌رسد که روش‌های تراکم‌پذیری مصنوعی توانایی همگرایی حل سریعتری برای جریان‌های دائمی نسبت به روش‌های ذکر شده دیگر دارد (Tamamidis et al., 1996). روش تراکم‌پذیری مصنوعی ابتدا برای مدل‌سازی جریان دائم استفاده می‌شد. تعمیم این روش برای حل معادلات جریان غیردائم در مطالعات Merkle and Athavale (1987)، Rogers and Kwak (1990) انجام شده است. روش تعمیم یافته به نام روش گام زمانی دوگانه شهرت یافته است. لازم به ذکر است که روش تراکم‌پذیری مصنوعی برای جریان دائم به روش گام زمانی یگانه شناخته می‌شود. Louda et al. (2008) با استفاده از دو روش مختلف به حل جریان غیر دائم با استفاده از مدل آشفتگی SST پرداخت. روش اول ایشان، استفاده از گام زمانی یگانه و با افزایش پارامتر تراکم‌پذیری مصنوعی و روش دوم استفاده از گام زمانی دوگانه بوده است. نتایج تحقیق این پژوهشگر و همکارانش نشان‌دهنده تفاوت نتایج این دو روش است.

در این مقاله به ارائه جزئیات یک مدل عددی تهیه شده به زبان فرترن برای مدل‌سازی جریان آشفته اطراف پایه‌های استوانه‌ای شکل پرداخته می‌شود. هدف از این مقاله بیان تفاوت روش‌های گام زمانی یگانه و دوگانه در روش تراکم‌پذیری مصنوعی با توجه به کاربرد آن در مدل‌سازی جریان پیچیده اطراف پایه و همچنین نشان دادن توانایی مدل عددی ارائه شده در به‌دست آوردن نتایج دقیق می‌باشد.

1. Fractional Step Method
2. Artificial Compressibility Method

۲- مدل عددی و معادلات حاکم

۲-۱- مدل‌سازی سه بعدی جریان آشفته با استفاده از RANS (مدل آشفتگی دو معادله‌ای)

مدل‌های دو معادله‌ای به عنوان زیربنای بسیاری از تحقیقات مربوط به مدل‌سازی جریان آشفته، به ویژه در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مدل‌ها حل دو معادله انتقال جداگانه سبب تعیین مقیاس سرعت آشفتگی و مقیاس طول آشفتگی می‌شوند. مدل $k-\varepsilon$ کاربردی‌ترین مدل آشفتگی دو معادله‌ای در روش RANS است. در مدل‌های لزجت گردابی[3] $k-\varepsilon$، میدان آشفته بر حسب دو متغیر انرژی جنبشی جریان آشفته (k) و نرخ هدررفت انرژی جنبشی آشفته (ε) بیان می‌شود. معادلات متوسط‌گیری شده در زمان رینولدز به صورت زیر می‌باشند (Aghaee and Hakimzadeh, 2010):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j}=f_{xi}-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\upsilon\left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2_j}\right)+\left(\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}\right) \qquad (۲)$$

در معادلات فوق u_i و u_j بیانگر سرعت‌های متوسط‌گیری شده در زمان در سه جهت اصلی می‌باشند. f_{xi} نیروهای حجمی وارد بر سیال، p فشار متوسط زمانی، υ لزجت سینماتیکی سیال و τ_{ij} تنش‌های مربوط به حرکت سیال می‌باشند که معروف به تنش‌های رینولدز می‌باشند که با استفاده از نظریه لزجت گردابی بوسینسک، برای یافتن آنها از رابطه زیر می‌توان استفاده کرد (Aghaee and Hakimzadeh, 2010):

3. Eddy-Viscosity

$$\tau_{ij}=\left(-\overline{u'_i u'_j}\right)=\upsilon_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}k\,\delta_{ij} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) υ_t لزجت گردابه‌ای می‌باشد که با استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ بدست می‌آید. k انرژی جنبشی جریان آشفته و برابر با $1/2(\overline{u'_i u'_i})$ و δ_{ij}، دلتای کرونکر می‌باشد. در این روش دو معادله زیر جهت بررسی تغییرات زمانی مربوط به انرژی جنبشی جریان و نرخ اضمحلال انرژی جنبشی حل می‌شود (Rodi, 1993):

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial u_i k}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+P-\varepsilon \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial u_i \varepsilon}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\upsilon_t}{\sigma_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}P-C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۵)$$

$$P=\upsilon_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad , \quad \upsilon_t=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۶)$$

روابط فوق شامل ۵ پارامتر ثابت است که در روش $k-\varepsilon$ استاندارد عبارتند از (Rodi, 1993): $C_\mu=0.09$، $\sigma_k=1.0$، $C_{1\varepsilon}=1.44$، $C_{2\varepsilon}=1.92$ و $\sigma_\varepsilon=1.3$.

۲-۲- روش LES

در روش LES، مقادیر مقیاسِ بزرگ آشفتگی -که شامل قسمت اعظم انرژی در جریان آشفته می‌باشند- به صورت صریح حل می‌شوند در حالی که مقیاس‌های کوچک که شامل قسمت کوچکی از انرژی می‌باشند، در میدان جریان مدل‌سازی می‌شوند (Cheng et al., 2003). در حقیقت در روش LES همه مقیاس‌های بزرگتر از شبکه به‌صورت مکانی و زمانی حل می‌شوند، در حالی که تأثیر مقیاس‌های کوچکتر از شبکه با استفاده از مدل‌های تحت شبکه[1] مدل‌سازی می‌شوند (Kim and Menon, 1998). معادلات فیلتر شده ناویر- استوکس کاملاً شبیه به معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز می‌باشد. با این تفاوت که تأثیر مقیاس‌های کوچک حل نشده در LES در تانسور تنشِ مقیاس تحت شبکه ظاهر می‌شود که باید مدل‌سازی شود. معمولترین مدل تحت شبکه برای مدل‌سازی τ_{ij}، از نوعِ مدلِ شبیه فرضیه لزجت گردابه‌ای است که به صورت زیر می‌باشد (Lam and Lin, 2008):

$$\tau_{ij}=\overline{u_i u_j}-\overline{u_i}\,\overline{u_j} \qquad (۷)$$

$$\tau_{ij}-\frac{1}{3}\tau_{kk}\delta_{ij}=\upsilon_t\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}+\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)=-2\upsilon_t\overline{S}_{ij} \qquad (۸)$$

که در آن $\overline{S}_{ij}$ نرخ کرنش می‌باشد و υ_t از رابطه (۹) محاسبه می‌شود (Lam and Lin, 2008):

$$\upsilon_t=l_s^2\left|\overline{S}_{ij}\right|,\left|\overline{S}_{ij}\right|=2\sqrt{\overline{S}_{ij}^2},l_s=\min(\kappa y, C_s\Delta^{\frac{1}{3}}) \qquad (۹)$$

که در آن l_s طول اختلاط برای مقیاس‌های تحت شبکه، C_s پارامتر مدل اسماگورینسکی است که در این تحقیق برابر ۰/۱۱ و Δ حجم شبکه می‌باشد. $\kappa=0.42$ و y فاصله از نزدیک‌ترین دیواره است (Lam and Lin, 2008). در هر نقطه از شبکه محاسباتی، فاصله مرکز سلول محاسباتی از تمامی دیواره‌ها (در این تحقیق فاصله از بستر و فاصله از پایه) محاسبه می‌شود و حداقل مقدار آنها به عنوان y در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳- گام زمانی یگانه[2] و دوگانه[3]

مدل عددی تهیه شده با استفاده از دو روند متفاوت به بررسیِ جریانِ آشفته اطراف پایه استوانه‌ای شکل می‌پردازد. برای مدل‌سازی معادلات سه بعدی ناویر- استوکس از روش تراکم‌پذیری مصنوعی[4] استفاده شده است. روش تراکم‌پذیری مصنوعی در سال ۱۹۶۷ توسط Chorin (1967) ابداع شد. این روش ابتدا برای مدل‌سازی جریان در حالت دائم[5] بکار برده می‌شد، ولی مدتی بعد با تغییراتی برای جریان‌های غیردائم[6] نیز تعمیم داده شد. در این روش، معادلات حاکم بسیار شبیه به معادلات جریان تراکم‌پذیر می‌باشند. شکل معادله پیوستگی برای این

1. Sub-Grid Scale Models

2. Single Time-Stepping
3. Dual Time-Stepping
4. Artificial Compressibility Method
5. Steady
6. Unsteady

روش به صورت زیر تغییر می‌کند (Louda et al., 2008):

$$\frac{1}{\rho\beta^2}\frac{\partial\overline{p}}{\partial\tau}+\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_i}=0 \qquad (۱۰)$$

در رابطه بالا $x_i = 1,2,3$ بیانگر جهت‌های اصلی (طولی، عرضی و جهت قائم) می‌باشد. τ زمان مجازی، ρ جرم مخصوص سیال و β پارامتر تراکم‌پذیری مصنوعی می‌باشد. این پارامتر مجموعه معادلات جریان را به یک حل جریان تراکم ناپذیر همگرا می‌کند. با تغییر β روند همگرایی و سرعت همگرایی حل کنترل می‌شود. یک روند همگرایی سریعتر می‌تواند با اتخاذ مقادیر بزرگ β و گام زمانی کوچک بدست آید. معمولاً مقایر β به طور ثابت در میدان عددی در نظر گرفته می‌شود و مقدار آن در حدود سرعت حداکثر جریان در میدان انتخاب می‌شود. این روش تعیین مقدار پارامتر تراکم‌پذیری مصنوعی از معمولترین روش‌های تعیین این پارامتر می‌باشد. روش‌های دیگر نیز در این زمینه مانند روش ذکر شده در مطالعه Kim and Menon (1999) وجود دارند. این محققان مقدار ثابتی را برای این پارامتر انتخاب کردند. در مطالعه Zhu and Jia (1997) نیز مقدار غیر ثابتی با استفاده از یک تابع برای پارامتر β در نظر گرفته شده است. مطالعه آنها همگرایی سریعتری را برای حل جریان دائم نشان داد. برای دستیابی به حل غیر دائم از دو روش گام زمانی یگانه و دوگانه استفاده می‌شود. در روش گام زمانی یگانه از حل معادلات ناویر-استوکس و رابطه تغییر شکل یافته پیوستگی استفاده می‌شود. این روش برای مدل‌سازی جریان دائمی می‌باشد، اما با بکار بردن مقادیر نسبتاً بزرگ برای β می‌توان به حل غیردایم معادلات دست یافت (Louda et al., 2008). روش گام زمانی دوگانه روش دقیقی برای بدست آوردن نتایج غیردائم در روش تراکم‌پذیری مصنوعی می‌باشد. در این روش علاوه بر اضافه شدن ترم‌های مجازی مشتق زمانی فشار به معادله پیوستگی، ترم‌های مجازی مشتق زمانیِ سرعت نیز به معادلات اندازه حرکت اضافه می‌شود. در این صورت معادله اندازه حرکت به شکل رابطه (۱۱) تغییر می‌یابد (Kim and Menon, 1999).

$$\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial\tau}+\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial t}=\frac{\partial\overline{u}_i\overline{u}_j}{\partial x_j}=f_{xi}-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}+\upsilon\left(\frac{\partial^2\overline{u}_i}{\partial x^2_j}\right)+\left(\frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j}\right) \qquad (۱۱)$$

که در آن τ و t به ترتیب زمان مجازی و زمان واقعی می‌باشد. در این روش به جای حل معادلات جریان در گام زمانی واقعی، معادلات به صورت پیاپی در گام زمانی مجازی حل می‌شوند. حل شدن معادلات در گام زمانی مجازی هنگامی اتفاق می‌افتد که به حل جریان دائمی در گام زمانی مجازی رسیده باشیم. پس از رسیدن به حل دائمی، گام زمانی واقعی یک گام به جلو می‌رود و روند حل برای مقدار جدید گام زمانی واقعی در گام زمانی مجازی تکرار می‌شود.

۳- گسسته‌سازی و حل معادلات

۳-۱- گام زمانی یگانه

در این مقاله روش حجم محدود برای گسسته‌سازی معادلات بکار رفته است. در روش گام زمانی یگانه با روش حل صریح معادلات و با استفاده از روش پنج مرحله‌ای رانگ-کوتا معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به ترتیب حل می‌شوند. این روش از دقت گسسته‌سازی مرتبه چهارم زمان برخوردار می‌باشد و عدد کورانت نزدیک به ۲ را فراهم می‌سازد (Kim and Menon, 1998). روابط استفاده شده مطابق زیر است:

$$Q^{(0)}=Q^m$$
$$Q^{(k)}=Q^0-\alpha_k\Delta\tau R\left(Q^{(k-1)}\right) \quad , \quad k=1,2,...,5 \qquad (۱۲)$$
$$Q^{m+1}=Q^{(5)}$$

در رابطه بالا Q پارامترهای جریان مثل سرعت و فشار می‌باشد. m نشان‌دهنده زمان مجازی است و α_k ضریب مربوط به روش رانگ-کوتا می‌باشد که در تحقیق حاضر عبارتند از (Kim and Menon, 1998):

$\alpha_1 = 0.059\ ,\ \alpha_2 = 0.145\ ,\ \alpha_3 = 0.273\ ,$
$\alpha_4 = 0.5\ ,\ \alpha_5 = 1.0$

$\Delta\tau$ گام زمانی مجازی و $R(Q)$ سایر پارامترهای ترم‌های جابجایی، پخش و گرادیان فشار است.

در مطالعه پیش رو، از روش اختصاص مقادیر تمام پارامترهای جریان (سرعت‌ها و فشار) به مرکز سلول[1] استفاده شده است. استفاده از این نوع اختصاص متغیرها به سلول محاسباتی، باعث ایجاد نوسان‌های غیر فیزیکی فشار در حل خواهد شد که در صورت عدم کنترل، مقادیر نوسانی رشد کرده و تمامی حل عددی را آلوده می‌کند. برای اجتناب از ایجاد این گونه نوسان‌های ناخواسته، از روش درون‌یابی مومنتم استفاده می‌شود. این روش ابتدا توسط رای و چو ارائه شد (Rhie and Chow, 1983). در پژوهش حاضر مقادیر ضریب تراکم‌پذیری مصنوعی در این روش کمی بزرگتر از مقادیر حداکثر سرعت جریان تنظیم شده است. به علت استفاده از روش صریح در حل، ناگزیر به در نظر گرفتن مقادیر کوچکی برای گام زمانی مجازی خواهیم بود. همچنین لازم به ذکر است که در روش صریح با افزایش مقدار ضریب تراکم‌پذیری، مقدار گام زمانی کوچکتری باید لحاظ شود (Louda et al., 2008). ترم‌های جابجایی با استفاده از روش جهت‌مند مرتبه سوم کوییک[2] و ترم‌های گرادیان فشار و پخش با استفاده از روش مرکزی گسسته‌سازی شدند. برای یکسان‌سازی پارامترهای استفاده شده در دو روشِ RANS و LES، از روش QUICK نیز برای گسسته‌سازی ترم‌های جابجایی در معادله مومنتم در روش LES استفاده شد و علت آن پایدارسازی حل و مقایسه دو روش حل در شرایط یکسان بوده است. لازم به ذکر است استفاده از روش QUICK همراه با LES یا DES در مقالات متعددی انجام شده است (Paik et al., 2007; Kim and Menon, 1999).

۳-۲- گام زمانی دوگانه

در روش گام زمانی دوگانه از دقت مرتبه اول زمانی (روش مرتبه اول اولر) برای گسسته‌سازی مشتقات زمانی مجازی و دقت مرتبه دوم برای گسسته‌سازی مشتقات زمانی واقعی استفاده شده است. گسسته‌سازی این ترم‌ها به صورت رابطه (۱۳) انجام شده است (Kim and Menon, 1999):

$$\frac{Q^{m+1}-Q^{m}}{\Delta\tau}+\frac{3Q^{m+1}-4Q^{n}+Q^{n-1}}{2\Delta t}=R\left(Q^{m+1,n+1}\right) \qquad (۱۳)$$

همان‌گونه که در رابطه (۱۳) مشاهده می‌شود، گسسته‌سازی در زمان مجازی به صورت ضمنی می‌باشد که مدل عددی را قادر می‌سازد تا از مقادیر بسیار بزرگتر گام زمانی مجازی استفاده کند و روند همگرایی در گام زمانی را تسریع می‌کند. برای حل ضمنی معادلات از روش تکرار گوس- سایدل خطی[3] با ضریب تخفیف کوچکتر از ۱ استفاده شده است. پس از رسیدن حل در گام زمانی مجازی به شرایط دائمی، گام زمانی واقعی یک گام به جلو حرکت خواهد نمود و مراحل حل مجدداً تکرار می‌شود. برای از بین بردن نوسان‌های فشار به علت نوع شبکه محاسباتی ذکر شده در فوق، در روش گام زمانی دوگانه نیز از روش درون‌یابی مومنتم برای سرعت‌های روی سطوح شبکه محاسباتی استفاده شده است. به دلیل وجود ترم‌های زمانی $n, n-1$ در گسسته‌سازی زمانی از روش بهبود یافته درون‌یابی مومنتم استفاده شد. این روش مربوط به جریان‌های غیردائمی بوده و مستقل از گام زمانی و ضریب تخفیف می‌باشد (Cubero and Fueyo, 2007). در روش ضمنیِ حل، ترم‌های جابجایی با استفاده از روش نیوتون خطی‌سازی شده و ترم‌های خطی‌سازی شده جابجایی با استفاده از

1. Collocated Mesh
2. QUICK
3. Line Relaxation Gauss-Seidel

روش ارائه شده توسط Khosla and Rubin (1974) به روش جهت‌مند کوییک به صورت ضمنی گسسته‌سازی شدند. ترم‌های فشار و پخش نیز به روش مرکزی گسسته‌سازی شدند. روند حل معادلات به صورت مجزا[1] صورت گرفته است. روش حل معادلات به صورت الگوریتم زیر انجام شده است:

۱) معادلات اندازه حرکت با استفاده از روش گوس- سایدل خطی حل می‌شوند.

۲) اگر خطای مربوط به محاسبات سرعت‌ها کوچکتر از 10^{-6} باشد، برنامه از حلقه تکرار گوس- سایدل خارج می‌شود. در غیر این صورت به مرحله (۱) باز می‌گردد.

۳) شرایط مرزی اعمال می‌شود.

۴) سرعت‌های روی سطوحِ سلول‌های محاسباتی با استفاده از روش درون‌یابی مومنتم محاسبه می‌شود.

۵) سرعت‌های محاسبه شده در مرحله (۴)، در معادله پیوستگی در روش تراکم‌پذیری مصنوعی جایگزین می‌شود تا مقادیر فشار در گام زمانی مجازی جدید محاسبه شود.

۶) اختلاف بین مقادیر فشار در گام زمانی مجازی جدید با گام زمانی مجازی پیشین مقایسه می‌شود.

۷) اگر مقدار اختلاف محاسبه شده در مرحله (۶) بزرگتر از 10^{-6} باشد، به مرحله (۱) بازگشته و مقادیر سرعت و فشار بدست آمده در گام زمانی مجازی پیشین در روابط حل گوس- سایدل جایگزین می‌شود تا مقادیر جدید این متغیرها در گام زمانی جدید مجازی محاسبه شود.

۸) اگر مقدار اختلاف محاسبه شده در مرحله (۶) کوچکتر از 10^{-6} باشد، مقادیر محاسبه شده سرعت و فشار به عنوان مقادیر گام زمانی واقعی در نظر گرفته شده و با این مقایر روند حل از مرحله (۱) پیگیری می‌شود.

۳-۳- شرایط مرزی

در ورودی جریان سرعت ورودی اعمال شده است ($u = u_0, v = 0, w = 0$). در مرز جامد در مدل LES از شرط مرزی عدم لغزش و در مدل $k-\varepsilon$ شرط مزبور به طور توأم با تابع دیواره استفاده شده است. همچنین در روش $k-\varepsilon$ مقادیری برای مقدار ضریب اضمحلال انرژی و ضریب انرژی جنبشی آشفتگی در ورودی اعمال شده است (Li and Yu, 1996). در روی سطح آزاد، شرط تقارن جریان و سطح آزاد همراه با وجود سرپوش صلب[2] اعمال شد. علت استفاده از این نوع شرط مرزی برای سطح آزاد این بوده است که تغییرات سطح آزاد در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی در این پژوهش (Roulund et al., 2005) بسیار ناچیز بوده که به دلیل پایین بودن عدد فرود جریان می‌باشد. برای مقادیر فشار در مرزها شرط نیومن با دقت مرتبه دوم در همه مرزها به غیر از مرز خروجی در نظر گرفته شد. در مرز خروجی برای سرعت شرط مرزی نیومن و برای فشار از روش Gresho (1991) جهت تعیین مقدار فشار استفاده شد.

٤- نتایج و بحث

برای بررسی نحوه عملکرد مدل عددی تهیه شده از دو مدل آزمایشگاهی استفاده شده است. در این قسمت ابتدا به بررسی نتایج عددی جریان اطراف پایه استوانه‌ای مربوط به مدل آزمایشگاهی Roulund et al. (2005) بر روی یک بستر صاف پرداخته می‌شود. مدل عددی تهیه شده برای دو مدل آشفتگی بررسی شده است. نتایج مربوط به مدل عددی با گام زمانی دوگانه نیز با نتایج آزمایشگاهی Dargahi (1989) مقایسه شده است. مشخصات جریان و مدل‌های آزمایشگاهی مذکور در جدول ۱ آورده شده است. مدل عددی تهیه شده برای جریان غیر دائم بر روی شبکه متعامد O شکل اجرا شده است. تمامی شبکه‌های ایجاد شده با استفاده از یک تابع هذلولوی در نزدیک دیواره‌ها متراکم شده است. تراکم

1. Segregated Method

2. Rigid Lid

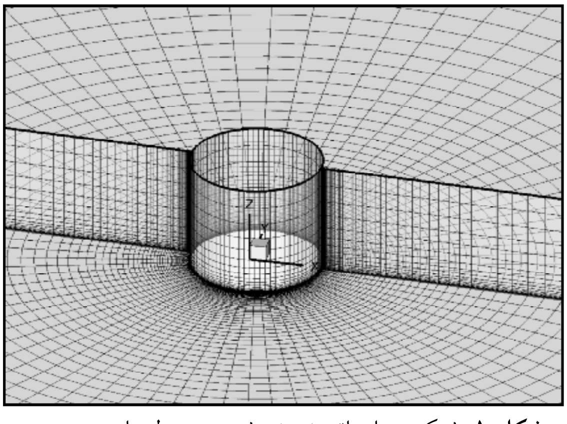
شبکه به صورتی است که شرایط لازم برای دقت در نزدیک مرزهای جامد فراهم شود، به صورتی که برای مدل آشفتگی $k-\varepsilon$، اولین لایه مجاور به دیواره باید در فاصله $30 < z^+ < 100$ قرار گیرد که در آن z^+ عدد رینولدز بر اساس سرعت برشی دیواره و فاصله شبکه از مرز جامد می‌باشد. ناحیه مذکور با ناحیه توزیع لگاریتمی سرعت جریان مرتبط است.

جدول ۱ مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی استفاده شده در مدل عددی برای مدل‌سازی

رینولدز پایه	فرود جریان	قطر پایه (m)	سرعت متوسط (m/s)	عمق آب (m)	نوع بستر	
$۱/۷ \times ۱۰^{۵}$	۰/۱۴	۰/۵۴	۰/۳۲۶	۰/۵۴	صاف	Roulund et al. (2005)
$۳/۹ \times ۱۰^{۴}$	۰/۱۸۶	۰/۱۵	۰/۲۶	۰/۲	صاف	Dargahi (1989)

برای مدل‌سازی جریان آشفته با استفاده از روش LES تراکم شبکه در نزدیک مرز جامد چنان تعیین شده است که اولین شبکه مجاور دیواره در محدوده $z^+ < 5$ قرار گیرد. شبکه‌های محاسباتی با تراکم‌های متفاوتی مورد آزمایش قرار گرفتند و از میان آنها بهینه‌ترین شبکه‌ها به لحاظ کم بودن هزینه محاسباتی و قابل قبول بودن دقت نتایج انتخاب شد. اندازه میدان محاسباتی برای شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی Roulund et al. (2005) $20D \times 20D \times 1D$ و برای شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی Dargahi (1989) از میدان محاسباتی به ابعاد $20D \times 20D \times 1.33D$ استفاده شده است که در آن D قطر پایه و ابعاد مذکور به ترتیب در راستای طول، عرض و عمق جریان می‌باشند که ارتفاع پایه‌ها (H) نیز برابر عمق جریان می‌باشند. برای مدل $k-\varepsilon$ از ۲۰ شبکه محاسباتی در عمق جریان و ۸۰ شبکه در راستای شعاعی و ۸۰ شبکه در راستای مماس بر مقطع دایروی پایه استوانه‌ای استفاده شده است و برای مدل‌های LES از ۲۰ شبکه محاسباتی در عمق و ۱۰۰ شبکه در راستاهای شعاعی و مماسی پایه استفاده شده است. لازم به ذکر است که عدم انتخاب شبکه‌های بیشتر و ریزتر، به علت محدودیت امکانات کامپیوتری در دسترس نویسندگان این مقاله در آغاز روند مدل‌سازی‌های عددی بوده است. نمونه‌ای از شبکه محاسباتی استفاده شده در مدل‌سازی عددی در شکل ۱ نشان داده شده است. گام زمانی استفاده شده برای زمان مجازی در مدل‌سازی با روش گام زمانی یگانه و دوگانه، برابر ۰/۰۰۱ ثانیه و گام زمانی واقعی برای روش گام زمانی دوگانه برابر ۰/۰۰۳ ثانیه در نظر گرفته شده است.

مقدار ضریب تخفیف برابر ۰/۸ در مدل ضمنی گوس–سایدل تنظیم شده است. همچنین ضریب تراکم‌پذیری مصنوعی برابر با حداکثر سرعت جریان و در کل زمان حل ثابت فرض شده است. برای مقایسه نتایج مربوط به روش LES نیاز به متوسط‌گیری زمانی نتایج عددی می‌باشد. به همین منظور نتایج مربوط به این مدل‌سازی در گام زمانی واقعی برای بازه زمانی لازم برای بیش از ۲۰ بار تشکیل و اضمحلال پیچک متوسط‌گیری شده است. با افزایش زمان متوسط‌گیری تغییر محسوسی در نتایج مشاهده نشد.



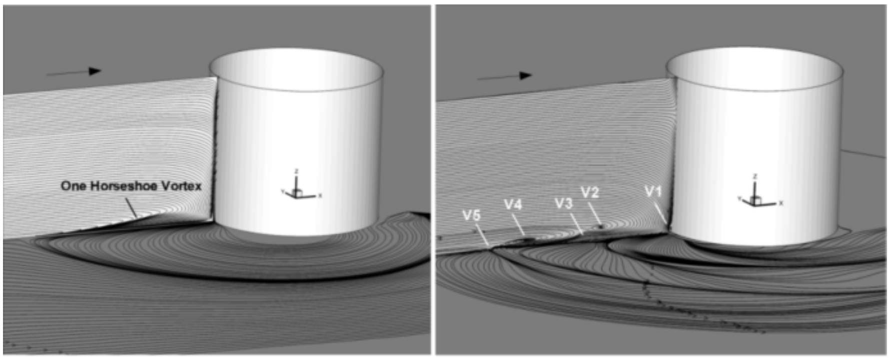
شکل ۱ شبکه محاسباتی استفاده شده در مدل‌سازی عددی

در ادامه پس از پرداختن به نتایج مربوط به مدل عددی با گام زمانی یگانه در مرحله نخست برای دو مدل آشفتگی مذکور، به بررسی نتایج مدل عددی لحظه‌ای و متوسط‌گیری شده در

زمان برای مدل آشفتگی LES با گام زمانی دوگانه پرداخته می‌شود. شکل ۲ خطوط جریان لحظه‌ای را برای زمان‌های مختلف در بالادست و پایین‌دست پایه با استفاده از مدل گام زمانی یگانه نشان می‌دهد.

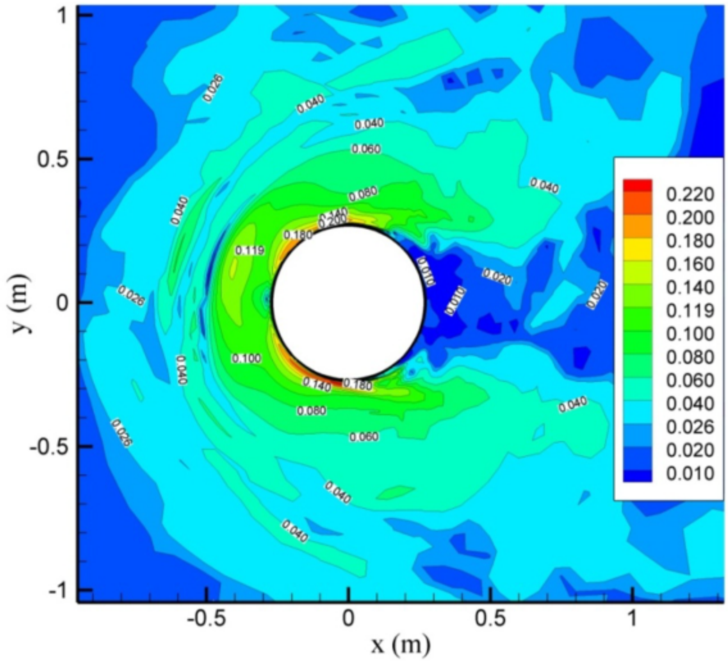
در این شکل که برای دو روش مدل‌سازی آشفتگی LES (الف) و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ (ب) نشان داده شده است تعداد پیچک‌های نعل اسبی در بالادست پایه در دو مدل کاملاً متفاوت است به این ترتیب که تعداد پیچک نعل اسبی در روش $k-\varepsilon$ برابر یک و در روش LES برابر پنج می‌باشد (V_1 تا V_5). این شکل به روشنی تفاوت نتایج مدل‌سازی جریان با استفاده از روش‌های مدل‌سازی آشفتگی مختلف را نشان می‌دهد. V_1 نزدیکترین پیچک در مجاورت پایه است. مرکز پیچک V_2 بیشترین فاصله از سطح بستر را دارد و مراکز پیچک‌های بعدی فاصله‌شان از بستر به ترتیب کاهش می‌یابند. با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی سایر محققان، پیچک‌های نعل اسبی رفتاری ثابت و بدون حرکت نداشته و حرکت آنها رفتاری پریودیک دارد. فرکانس حرکت این پیچک‌ها در بالادست پایه و بزرگ و کوچک شدن آنها می‌تواند تأثیر لحظه‌ای شدیدی بر تنش برشی بستر داشته باشد و دلیل آن افزایش قابل توجه تنش برشی بستر در زیر این پیچک‌هاست. Dargahi (1989) مقدار فرکانس نوسان‌های پیچک‌های نعل اسبی را از ۰/۱ تا ۲ گزارش کرده است. تنش برشی بستر با استفاده از تنش ناشی از لزجت سیال قابل محاسبه بوده و به علت قرارگرفتن در ناحیه کاملا لزج از رابطه لزجت نیوتون محاسبه می‌شود. همچنین تنش برشی لحظه‌ای در بستر در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار حداکثر تنش برشی در کناره‌های پایه مشاهده می‌شود که علت آن انقباض جریان در عبور از کناره‌های پایه می‌باشد. با توجه به شکل، مقدار حداکثر تنش برشی در زاویه ۴۵ تا ۵۰ درجه نسبت به بالادست و در دو طرف پایه اتفاق می‌افتد. نتایج آزمایشگاهی نیز، شروع پدیده آبشستگی را از این نقاط نشان می‌دهد، اما با گذشت زمان، با بزرگ شدن پیچک نعل اسبی، آبشستگی بیشتر تحت تأثیر پیچک نعل اسبی قرار می‌گیرد (Aghaee and Hakimzadeh, 2011). در بالادست پایه ،توزیع تنش کاملاً متأثر از موقعیت پیچک نعل اسبی می‌باشد، چنان که در زیر پیچک نعل اسبی مقادیر تنش برشی بستر تغییر محسوسی دارند.

در شکل ۴ مقادیر سرعت جریان در راستای جریان در بالادست و پایین‌دست پایه در صفحه تقارن پایه، با نتایج آزمایشگاهی Roulund et al. (2005) مقایسه شده‌اند. نتایج مدل عددی در بالادست پایه در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، غیر از مقادیر سرعت در نزدیک بستر، مطابقت خوبی دارد. در پایین‌دست پایه نیز مقادیر سرعت به دست آمده از مدل عددی همخوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

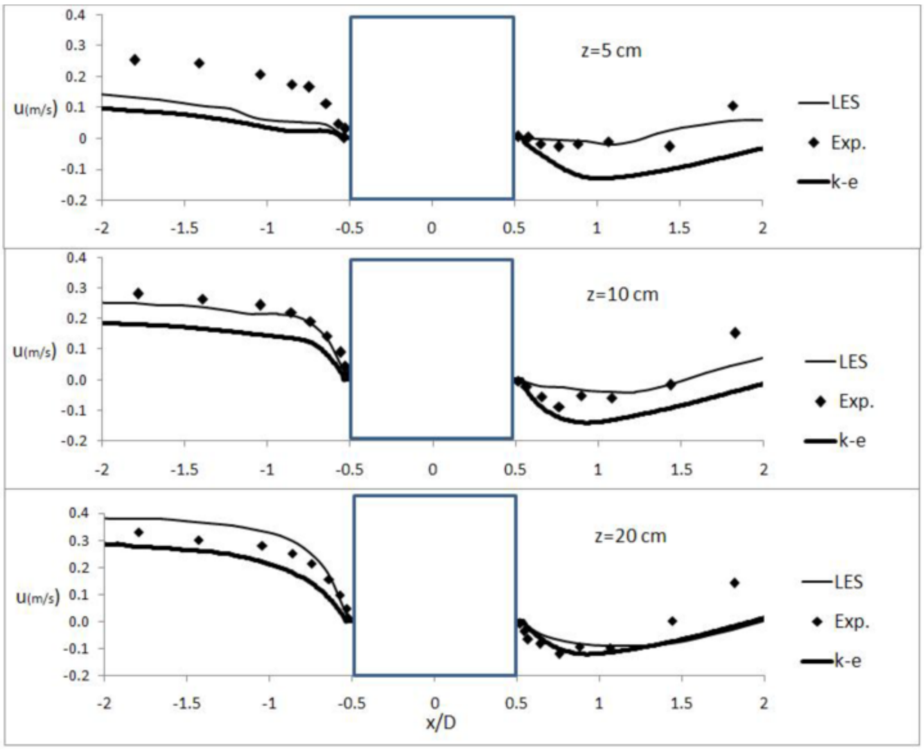


ب- مدل‌سازی آشفتگی $k-\varepsilon$ الف- مدل‌سازی آشفتگی LES

شکل ۲ پیچک‌های نعل اسبی در صفحه تقارن پایه با استفاده از گام زمانی یگانه



شکل ۳ توزیع تنش برشی لحظه‌ای بستر (بر حسب نیوتن بر متر مربع) در اطراف پایه با استفاده از روش LES



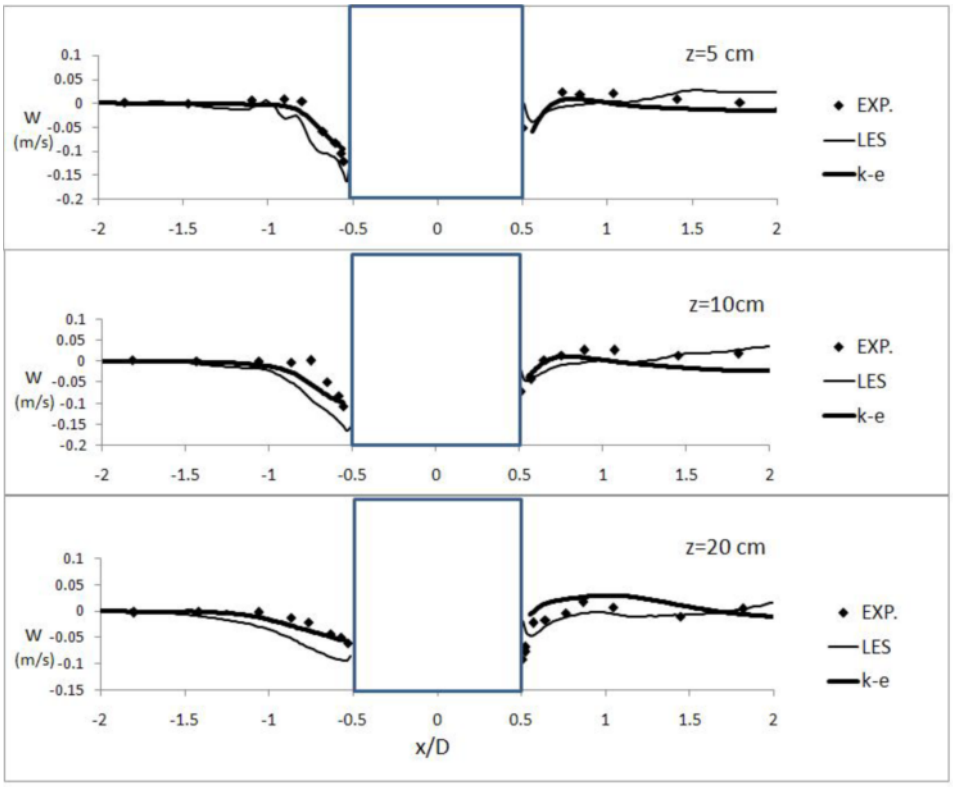
شکل ۴ مقادیر سرعت در راستای جریان، در بالادست و پایین‌دست پایه در صفحه تقارن پایه برای روش‌های مختلف مدل‌سازی آشفتگی در عمق‌های مختلف جریان

نتایج مدل عددی LES در مقایسه با مدل $k-\varepsilon$ نزدیکی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین مقایسه سرعت‌های قائم در بالادست و پایین‌دست پایه استوانه‌ای شکل در محور تقارن پایه با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۵

نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده پیش‌بینی نسبتاً مناسب هر دو روش مدل‌سازی آشفتگی در بالادست و پایین‌دست پایه است، گرچه مقادیر مربوط به سرعت‌های قائم در روش LES در بالادست پایه، جریان رو به پایین قوی‌تری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

در شکل ۶ نیز تغییرات لحظه‌ای جریان در در بالادست و پایین‌دست پایه در صفحه تقارن پایه در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. الگوی پیچیده جریان با استفاده از روش LES کاملا قابل مشاهده می‌باشد. در بالادست پایه در مجاورت سطح آب، جریان رو به بالای ضعیفی مشاهده می‌شود که این امر حاکی از این مطلب است که محل وقوع حداکثر فشار روی پایه کاملاً در بالاترین ارتفاع پایه قرار ندارد. جریان رو به پایین نیز در اثر برخورد جریان با بستر دچار چرخش شده و پیچکی را ایجاد می‌کند. این پیچک که در برابر جریان نزدیک شونده از بالادست قرار می‌گیرد، خود می‌تواند پیچک‌های دیگری ایجاد کند. همان‌گونه که پیش از این در بخش مقدمه اشاره شد به مجموعه این پیچک‌ها، پیچک نعل اسبی گفته می‌شود که دور تا دور پایه امتداد یافته و شکلی شبیه نعل اسب پیدا می‌کند. کوچکترین پیچک نعل اسبی در مجاورت پایه رخ می‌دهد (پیچک V_1). این پیچک با توجه به جهت جریان از چپ به راست، دارای چرخش خلاف عقربه‌های ساعت می‌باشد که می‌تواند در شروع روند آبشستگی در بالا دست پایه تأثیر چشمگیری داشته باشد.

با توجه به شکل، جهت چرخش پیچک‌های نعل اسبی به صورت یکی در میان در جهت خلاف عقربه‌های ساعت می‌باشد. در پایین‌دست پایه، شکل و الگوی جریان پیچیده‌تر می‌باشد و بیشتر به عدد رینولدز پایه و ارتفاع پایه (عمق جریان) بستگی دارد.

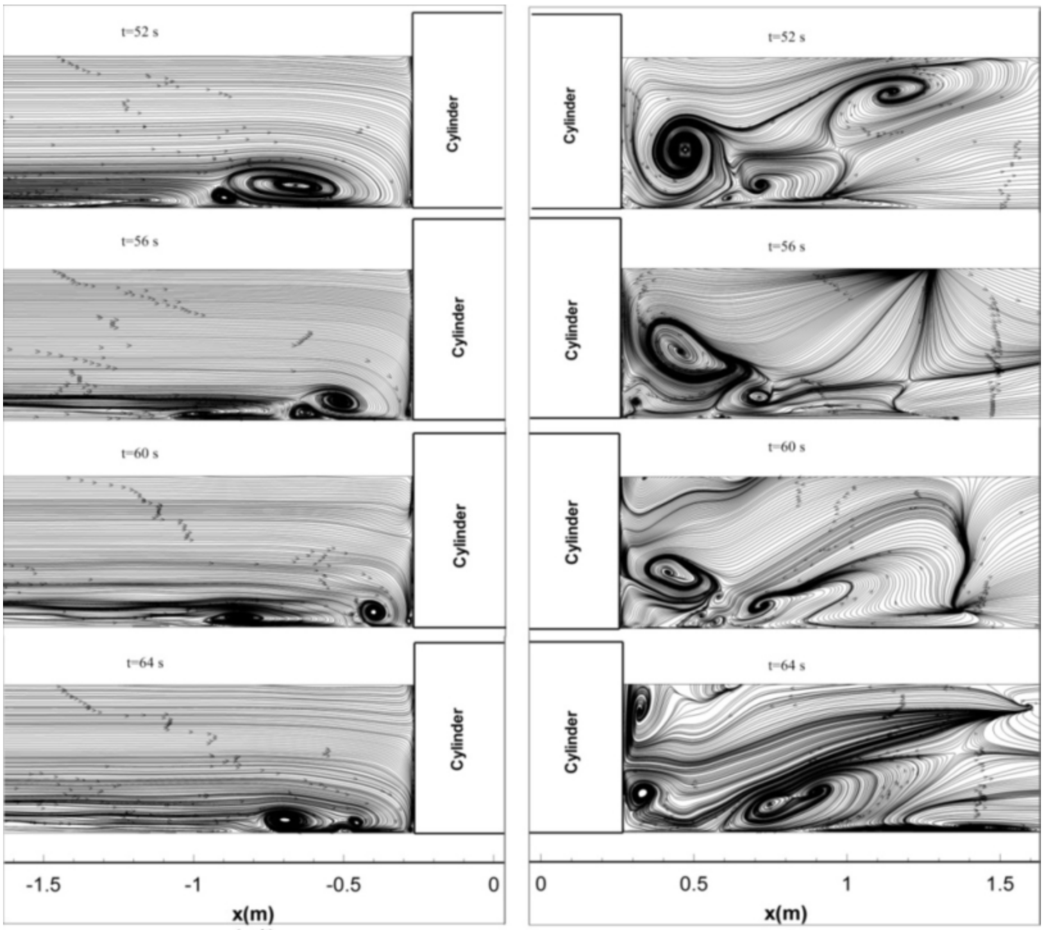


شکل ۵ سرعت‌های قایم در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در بالادست و پایین‌دست پایه در محور تقارن پایه در عمق‌های مختلف

باید اشاره کرد که اگر ارتفاع پایه در مقایسه با قطر پایه از نسبت ۲ کوچکتر باشد ($H/D<2$) جریان گردابی پشت پایه از حالت تقارن خود خارج شده و حتی از بین می‌رود (Rodi, 2006) که در مورد مدل‌های استفاده شده در این تحقیق نیز همین حالت وجود دارد.

الگوهای جریان نشان داده شده در شکل ۶ در بالادست و پایین‌دست پایه، فقط با استفاده از روش LES قابل مشاهده است، اما در مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ فقط یک پیچک نعل اسبی مشاهده می‌شود و هیچ‌گونه رشد و یا تغییر اندازه و یا تغییر در موقعیت پیچک نعل اسبی ایجاد نمی‌شود. همچنین در مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ هیچ‌گونه تشکیل و اضمحلال پیچک در پشت پایه مشاهده نشد.

با توجه به نتایج مدل عددی با گام زمانی یگانه می‌توان گفت که مدل عددی مذکور با استفاده از روش LES نتایج نسبتاً قابل قبول‌تری در مقایسه با روش RANS ارائه می‌کند، اما به نظر می‌رسد مدل گام زمانی یگانه در ارائه نتایج دقیق در مجاورت مرزهای جامد از دقت کافی برخوردار نیست که این مشکل می‌تواند طول جدایش را در جلوی پایه (طول پیچک نعل اسبی و طول پیچک پشت پایه) بیش از مقدار نتایج آزمایشگاهی ارائه دهد. همچنین در جلوی پایه، جریان رو به پایین قوی‌تری نسبت به نتایج آزمایشگاهی بوجود می‌آید.



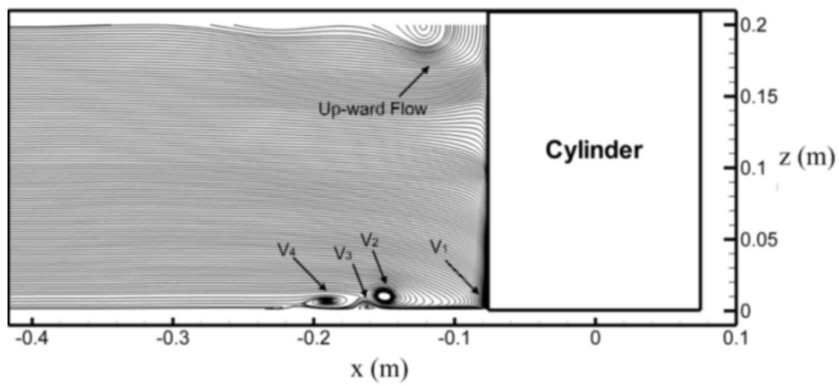
(الف)		(ب)

شکل ۶ خطوط لحظه‌ای جریان در صفحه تقارن پایه و در زمان‌های مختلف با استفاده از روش LES
الف- بالادست پایه، ب- پایین‌دست پایه

با توجه به مشکلات مربوط به دقت مدل گام زمانی یگانه در پیش بینی جریان غیر دائم باید از روش دقیقتر مدل گام زمانی دوگانه استفاده کرد. شایان ذکر است که محققان در ابتدا، مدل گام زمانی یگانه را فقط برای حل جریان‌های دائم استفاده کرده‌اند، با این وجود نتایج مربوط به مدل گام زمانی یگانه در تحقیق حاضر تا حدود قابل قبولی توانسته به پیش‌بینی جریان غیردایم در این تحقیق بپردازد. در ادامه، نتایج مربوط به مدل‌سازی جریان اطراف پایه استوانه‌ای با استفاده از مشخصات آزمایشگاهی پایه و جریان مربوط به Dargahi (1989) با استفاده از مدل عددی گام زمانی دوگانه ارائه می‌شود.

برای این منظور مدل گام زمانی دوگانه، تنها با روش LES بکار برده شده است. شکل ۷ نشان‌دهنده الگوی جریان در بالادست پایه و شکل پیچک‌های نعل اسبی می‌باشد. تعداد چهار پیچک نعل اسبی در بالادست پایه در مجاورت بستر قابل مشاهده می‌باشد ($V_1 - V_4$). فاصله این پیچک‌ها از پایه به ترتیب برابر با $0.015D$، $0.5D$، $0.583D$، $0.771D$ می‌باشد. همچنین یک جریان روبه بالا نیز در بالادست پایه در محور تقارن پایه مشاهده می‌شود که این جریان نشان از واقع شدن حداکثر مقدار فشار در نزدیکی سطح آب دارد. فاصله جدایش در بالادست پایه در مقایسه با مدل گام زمانی یگانه کوچکتر است و این امر نشان‌دهنده آن است که با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود، مدل گام زمانی دوگانه با دقت و توانایی بیشتری توانسته است به پیش‌بینی الگوی جریان بپردازد. در شکل ۸ خطوط جریان متوسط‌گیری شده در زمان در پشت پایه ارائه شده است. طول جدایش در پایین‌دست پایه برابر با $1.2D$ می‌باشد. این طول جدایش کمی بزرگتر از مقدار واقعی طول جدایش در مدل‌های آزمایشگاهی می‌باشد که یکی از دلایل آن می‌تواند به نحوه گسسته‌سازی ترم‌های جابجایی در معادله مومنتم مربوط شود، زیرا مدل‌های گسسته‌سازی جهت‌مند مانند کوییک و یا حتی مرتبه‌های بالاتر این روش، عموماً سبب تشکیل طول گردابه بزرگتر در پشت پایه می‌شود. این نتیجه در توافق با نتایج و یافته‌های مدل عددی Breuer (1998) می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که مدل گام زمانی یگانه از مدل گام زمانی دوگانه طول گردابه بزرگتر و دورتر از نتایج آزمایشگاهی ارائه می‌دهد.

شکل ۹ مقایسه توزیع سرعت‌ها مربوط به مدل‌سازی عددی با روش LES و گام زمانی دوگانه را با نتایج آزمایشگاهی Dargahi (1989) نشان می‌دهد. توزیع سرعت‌ها در عمق جریان و مربوط به موقعیت‌های مختلف بالادست و پایین‌دست پایه استوانه‌ای می‌باشد. نتایج مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. در بالادست پایه در فاصله $x / D = -0.73$ از مرکز پایه، نتایج مدل عددی نشان‌دهنده مقدار منفی سرعت در مجاورت بستر می‌باشد.



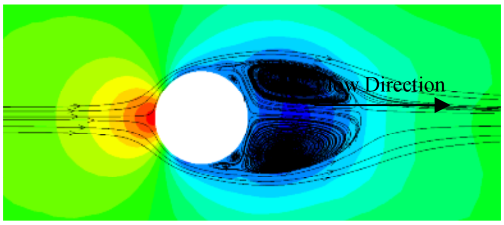
شکل ۷ خطوط جریان متوسط‌گیری شده در زمان با استفاده از LES و گام زمانی دوگانه، در بالادست پایه

این مقدار منفی نشان‌دهنده جریان برگشتی در جلوی پایه و پیچک نعل اسبی می‌باشد که طول این پیچک در مدل‌سازی حاضر بزرگتر از مقادیر آزمایشگاهی است. همچنین مقادیر سرعت در مجاورت مرز بستر کمی کوچکتر از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد که این مورد و همچنین طول پیچک نعل اسبی می‌تواند به علت ناکافی بودن تعداد شبکه‌های محاسباتی در مجاورت مرز بستر می‌باشد. در پایین‌دست پایه در فاصله بسیار نزدیک به پایه ($x/D = 0.57$) مقدار سرعت درعمق در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی اختلافی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است این اختلاف همچنین در مقایسه مدل‌سازی عددی Salaheldin et al. (2004) با نتایج آزمایشگاهی Dargahi (1989) مشاهده می‌شود.

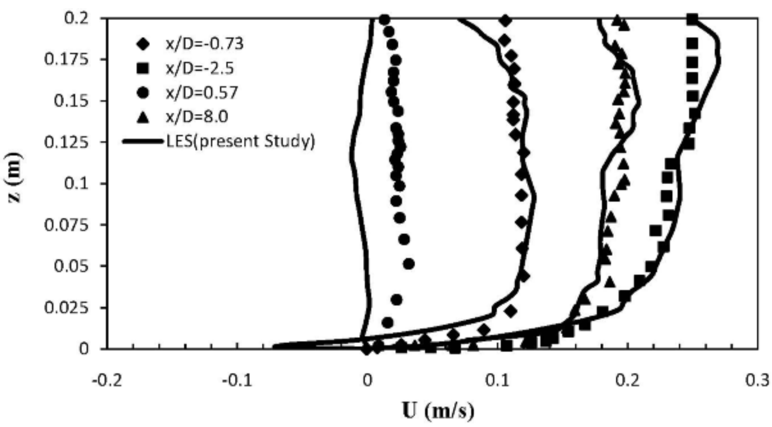
در شکل ۱۰ مقایسه‌ای برای مقادیر ضریب فشار در بالادست پایه، بین مدل عددی گام زمانی دوگانه و نتایج آزمایشگاهی (Dargahi 1989) ارائه شده است. ضریب فشار مربوط به جلوی پایه و در خط تقارن پایه می‌باشد. نتایج نشان دهنده کاهش مقادیر فشار با نزدیک شدن به بستر می‌باشد که در نزدیکی بستر به حداقل مقدار خود می‌رسد و مجدداً با رسیدن به بستر افزایش می‌یابد. نتایج مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

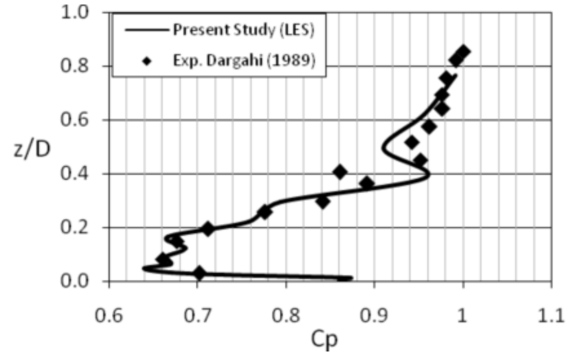
در این مقاله نتایج مربوط به مدل‌سازی جریان در اطراف پایه‌های استوانه‌ای ارائه شد. مدل عددی با استفاده از روش حجم محدود و با روش تراکم‌پذیری مصنوعی تهیه شده است. برای تعیین مقادیر سرعت بر روی سطوح شبکه‌های محاسباتی از روش درون‌یابی مومنتم استفاده شده است. روش‌های LES و RANS برای مدل‌سازی آشفتگی جریان در این تحقیق بکار رفته است. برای مدل‌سازی جریان غیردائم از دو روش گام زمانی یگانه و دوگانه استفاده شد. ابتدا مدل‌سازی‌ها با استفاده از گام زمانی یگانه و روش‌های RANS و LES انجام شد. نتایج حاصل نشان دهنده برتری محسوس روش LES بر روش RANS می‌باشد.



شکل ۸ خطوط جریان و خطوط هم فشار متوسط‌گیری شده در زمان (بر حسب نیوتن بر متر مربع) در اطراف پایه با استفاده از روش LES و گام زمانی دوگانه



شکل ۹ توزیع سرعت در عمق جریان در بالادست و پایین‌دست پایه. خطوط، مربوط به نتایج مدل‌سازی و علائم توپر، مربوط به نتایج آزمایشگاهی درگاهی (۱۹۸۹) می‌باشد. (مقادیر مربوط به آزمایش از مقاله صلاح الدین و همکاران (۲۰۰۴) برداشت شده است.)



شکل ۱۰ مقادیر ضریب فشار در بالادست و در مجاورت پایه با استفاده از مدل‌سازی گام زمانی دوگانه

برای مدل‌سازی جریان غیر دائم در روش تراکم‌پذیری مصنوعی از روش گام زمانی دوگانه استفاده شد. سپس تنها روش LES به عنوان روش مناسبِ مدل‌سازی آشفتگی برای مدل‌سازی جریان غیر دائم انتخاب شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها نشان‌دهنده توانایی روش LES در پیش‌بینی دقیق‌تر گردابه‌های نعل اسبی در بالادست پایه و حرکت جریان گردابی در پشت پایه می‌باشد. در مقایسه با مدل‌سازی جریان غیردائم نیز مدل گام زمانی دوگانه نتایج بهتری در مقایسه با گام زمانی یگانه ارائه کرده است. بهبود نتایج در مدل گام زمانی دوگانه در فاصله جدایش در جلوی پایه و همچنین در طول گردابه در پشت پایه می‌باشد. همچنین مدل عددی ارائه شده جهت مدل‌سازی جریان‌های سه بعدی در اطراف پایه استوانه‌ای شکل با روش گام زمانی دوگانه و روش LES توانسته به خوبی جریان را مدل‌سازی نموده و نتایج قابل قبولی –با توجه به تعداد شبکه‌های محاسباتی بکار گرفته شده– بدست آورد. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی موجود، مبین این مهم است. لازم به ذکر است که افزایش تعداد شبکه‌های محاسباتی در روش LES، می‌تواند نتایج دقیق‌تری را در مدل‌سازی جریان ارائه کند که در مطالعات آتی نویسندگان مقاله مورد توجه بیشتر قرار می‌گیرد.

٦- تشکر و قدردانی

قسمتی از مدل‌سازی‌های مطالعه حاضر با استفاده از کلاسترهای با پردازش قوی انجام شده است. بدین وسیله صمیمانه از مرکز ابرrایانش ملی- دانشگاه صنعتی اصفهان- (http://nhpcc.iut.ac.ir) به جهت اختصاص زمان و حافظه محاسباتی قدردانی و تشکر می‌شود.

۷- فهرست علایم

پارامتر اسماگورینسکی	C_s
قطر پایه	D
نیروهای حجمی	f_{xi}
عمق جریان (ارتفاع پایه)	H
گام زمانی مجازی	m
گام زمانی واقعی	n
فشار	p
مؤلفه‌های سرعت جریان	u_i
سرعت ورودی جریان	u_0
جهات اصلی	x_i
فاصله از دیواره	y
ضرایب رانگ-کوتا	α_k
پارامتر تراکم‌پذیری مصنوعی	β
دلتای کرونکر	δ_{ij}
حجم سلول محاسباتی	Δ
گام زمان حقیقی (واقعی)	Δt
گام زمان مجازی	$\Delta\tau$
تنش‌های برشی سیال	τ_{ij}
جرم مخصوص سیال	ρ
لزجت سینماتیکی	υ
لزجت گردابی سینماتیکی	υ_t
ضریب فن کارمن	κ
انرژی جنبشی جریان آشفته	k
اضمحلال انرژی جنبشی جریان آشفته	ε
عدد رینولدز بر اساس سرعت برشی دیواره و فاصله شبکه از مرز جامد	z^+

۸- منابع

آقایی شلمانی، ی. (۱۳۸۶). "مدل عددی بررسی اثر زمان بر آبشستگی پایه‌های استوانه‌ای شکل"، دانشگاه صنعتی سهند، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های دریایی، تبریز.

Aghaee, Y. and Hakimzadeh, H. (2010). "Three dimensional numerical modeling of flow around bridge piers using LES and RANS." International Conference of River Flow, Germany.

Benarafa, Y., Cioni, O., Ducros, F. and Sagaut, P. (2006). "RANS/LES coupling for unsteady turbulent flow simulation at high Reynolds number on coarse meshes", Comp. Methods Appl. Mech. Eng., 195, pp. 2939-2960.

Breuer, M. (1998). "Numerical and modeling influences on large eddy simulations for the flow past a circular cylinder", International Journal of Heat and Fluid Flow, 19, pp. 512–521.

Cheng, Y., Lien, F. S., Yee, E. and Sinclair, R. (2003). "A comparison of large Eddy simulations with a standard $k-\varepsilon$ Reynolds-averaged Navier–Stokes model for the reduction of a fully developed turbulent flow over a matrix of cubes", Journal Wind Engineering and industrial Aerodynamics, 91, pp. 1301-1328.

Chorin, A. J. (1967). "A numerical method for solving incompressible viscous flow problems", J. Comput. Phys., 2, pp. 12-26.

Chorin, A. J. (1968). "Numerical solution of Navier-Stokes equations", Math. Comput., 22, pp. 745-762.

Cubero, N. and Fueyo, A. (2007). "A compact momentum interpolation procedure for unsteady flows and relaxation", Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 52(6), pp. 507-529.

Dargahi, B. (1989). "The turbulent flow Field around a circular cylinder", Experiments in fluids, 8, pp. 1-12.

Ishida, H., Yuhi, M. and Umeda, S. (1999). "A numerical study of sinusoidal oscillatory flows around a vertical wall-mounted cylinder", Coastal Engineering, 41(3), pp. 225-246.

Gresho, P. M. (1991). "Some current CFD issues relevant to the incompressible Navier–Stokes equations", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 87, pp. 201–252.

Gushchin, V. A., Kostomarov, A. V., Matyushin, P. V. and Pavlyukova, E. R. (2002). "Direct numerical simulation of the transitional separated flows around a sphere and a circular cylinder", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90, pp. 341-358.

Harlow, F. H. and Welch, J. E. (1965). "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow with free surfaces", Physcis of Fluids, 8, pp. 2182-2189.

Khosla, P. K. and Rubin, S. G. (1974). "A diagonally dominant second-order accurate implicit scheme", Computers and Fluids, 2, 207-209.

Khosronejad, A., Kang, S. and Sotiropoulos, F. (2012). "Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers", Advances in Water Resources, 37, pp. 73-85.

Kim, W. W. and Menon, S. (1999). "An unsteady incompressible Navier–Stokes solver for large eddy simulation of turbulent flows", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 31, pp. 983-1017.

Lam, K. and Lin Y.F. (2008). "Large eddy simulation of flow around wavy cylinders at a subcritical Reynolds number", Int. J. Heat Fluid Flow, 29(4), pp. 1071-1088.

Lee, S.O. and Sturm, T.W. (2009). "Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour", Journal of Hydraulic engineering, 135(10), pp. 793-802.

Li, C. W. and Yu, T. S. (1996). "Numerical investigation of turbulent shallow recirculation flows by a quasi-three dimensional model." International Journal for Numerical Methods in Fluids, 23, pp. 485-501.

Louda, P., Kozel, K. and Prihoda, J. (2008). "Numerical solution of 2D and 3D viscous incompressible steady and unsteady flows using artificial compressibility method." International Journal for Numerical Methods in Fluids, 56, pp. 1399-1407.

Rogers S.E. and Kwak D. (1990). "Upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations", AIAA J., 28(2), pp. 253-262.

Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsoe, J. and Michelsen, J. (2005). "Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile", J. Fluid Mech., 534, pp. 351-401.

Salaheldin, T. M., Imran, J. and Chaudhry, H. (2004). "Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers", Journal of Hydarulic Engineering, 130(2), pp. 91-100.

Tamamidis, P., Zhang, G. and Assanis, D. N. (1996). "Comparison of pressure based and artificial compressibility methods for solving 3D steady incompressible viscous flows", Journal of Computational Physics, 124, pp. 1-13.

Tseng, M. H., Yen, C. L. and Song, C. C. S. (2000). "Computation of three-dimensional flow around square and circular piers", International Journal of Numerical Methods in Fluids, 34, pp. 207-227.

Wissink, J. R. and Rodi, W. (2008). "Numerical study of the near wake of a circular cylinder", International Journal of Heat and Fluid Flow, 29(4), pp. 1060-1070.

Zhao , M., Cheng, L. and Zang, Z. (2010) "Experimental and numerical investigation of local scour around a submerged vertical circular cylinder in steady currents", Coastal Eng., 57(8), pp. 709-721.

Zhu, Z.Q. and Jia, J.B. (1997). "Numerical simulation of incompressible Navier-Stokes and Euler equations to the vortical flow about a delta wing", Acta Mechanica, 122, pp. 21-31.

Majumdar, S. and Rodi, S. (1989). "Three-dimensional computation of flow past cylindrical structures and model cooling towers", Building and Environment, 24(1), pp. 3-22.

Melville, B. and Chiew, Y. (1999). "Time scale for local scour at bridge piers." J. Hydraul. Eng., 125(1), pp. 59-65.

Merkle, C.L. and Athavale, M. (1987). "Time-accurate unsteady incompressible flow algorithms based on artificial compressibility", AIAA Paper, pp. 87-1137.

Olsen, N. R. B. and Melaaen, M. C. (1993). "Three-dimensional calculation of scour around cylinders". Journal of Hydraulic Engineering, 119(9), pp. 1048-1054.

Paik J., Escauriaza C. and Sotiropoulos F. (2007). "On the bimodal dynamics of the turbulent horseshoe vortex system in a wing-body junction", Phys. Fluids., 19, 045107, pp. 1-20.

Rhie, C. M. and Chow, W. L. (1983). "Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation", AIAA Journal, 21(11), pp. 1525-1532.

Rodi, W. (1993). "Turbulence models and their application in hydraulics-A state of the art reviews", 3rd Ed., International Association for Hydraulic Research, Delft, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Rodi, W. (1997). "Comparison of LES and RANS calculation of the flow around bluff bodies", J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, pp. 55-75.

Rodi, W. (2006). "DNS and LES of some engineering flows", Fluid Dynamic Research, 38, pp. 145-173.