

مقایسه مدل‌های آشفته‌گی در شبیه‌سازی عددی جریان در اطراف عرشه پل‌های مستغرق

مصطفی حمزئی^۱، میترا جوان^۲، افشین اقبال زاده^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه رازی

۲ و ۳- استادیار گروه مهندسی عمران، پژوهشکده تحقیقات پیشرفته آب و فاضلاب، دانشگاه رازی

* کرمانشاه، باغ ابریشم، دانشگاه رازی
eghbalzadeh@gmail.com

چکیده- در زمان رخدادهای بحرانی در رودخانه‌ها مانند سیل، عرشه پل ممکن است به‌صورت جزئی یا بطور کامل در جریان رودخانه غرق شود. غرق شدن عرشه پل، وضعیتی بحرانی برای پایداری سازه‌ای محسوب می‌شود. در مقاله حاضر، میدان متوسط جریان در اطراف عرشه پل و ضریب نیروی درگ متوسط زمانی وارد شده بر آن با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت نسخه 12.0.16 و با بهره‌گیری از سه مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ استاندارد، $k-\epsilon$ RNG و $k-\epsilon$ Realizable شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی‌ها از روش‌های VOF و سطح صلب برای شبیه‌سازی سطح آزاد استفاده شده است. از طرح‌های بازسازی و حجم محدود به‌منظور تعیین موقعیت سطح آزاد در روش VOF استفاده شده و نتایج حاصل مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که برای عرشه‌های پل اندکی غرق شده، نتایج مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ استاندارد و روش شبیه‌سازی سطح آزاد VOF با استفاده از طرح بازسازی هندسی، تطابق مناسب‌تری با نتایج آزمایشگاهی دارد. در شرایط غرق‌شدگی کامل عرشه، مدل‌های آشفته‌گی $k-\epsilon$ RNG و $k-\epsilon$ Realizable معمولاً دقت بهتری دارند. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی سطح آزاد VOF، طرح‌های بازسازی نمی‌توانند اختلاط آب و هوا را شبیه‌سازی کنند و برای این منظور باید از طرح‌های از طرح‌های حجم محدود استفاده شود.

کلیدواژگان: شبیه‌سازی عددی، مدل آشفته‌گی، فلوئنت، نیروی درگ، عرشه پل.

۱- مقدمه

عرشه پل‌های رودخانه‌ای مستغرق را مطالعه کرده‌اند. اندرکنش سیال جاری و مقطع مستطیلی را ناوداسکر (۱۹۹۱)، ناکامورا و همکاران (۱۹۹۱)، ناوداسکر و راک ول (۱۹۹۳)، سیمی و اسکاتلان (۱۹۹۶)، راک ول (۱۹۹۸)،

استغراق عرشه پل در زمان سیل ممکن است پایداری سازه را به‌طور جدی به خطر اندازد. تعدادی از پژوهشگران با استفاده از شبیه‌سازی آزمایشگاهی و عددی

هوریگان و همکاران (۲۰۰۱)، با مدل‌سازی آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده‌اند. با وجود این هنوز موضوعاتی مانند تحلیل تأثیر شرایط مرزی نامتقارن بر بارگذاری هیدرودینامیکی سازه پل‌ها، جای مطالعه و بررسی فراوان دارد (همون و سانتی (۲۰۰۲)، شیمادا و ایشیارا (۲۰۰۲)). استغراق عرشه پل‌های رودخانه‌ها مثالی از شرایط مرزی نامتقارن برای سازه پل است. به بیان دیگر با قرار گرفتن سازه در معرض جریان با سطح آزاد، بارهای دینامیکی وارد شده بر سازه تحت تأثیر وضعیت مرزی نامتقارن خواهد بود. با وجود اهمیت مشکل استغراق عرشه پل‌های رودخانه‌ها، تحقیقات آزمایشگاهی اندکی در این زمینه در دست است. تینش (۱۹۶۵) و دنسون (۱۹۸۲) جریان با سطح آزاد روی سازه عرشه پل‌های دارای شکل خاص را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار داده‌اند، اما در سایر تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه عرشه پل به صورت مقطع مستطیلی در نظر گرفته شده است (مالاواسی و گواداگینی (۲۰۰۳)، مالاواسی و همکاران (۲۰۰۴)، پایسک و همکاران (۲۰۰۲)). مالاواسی و گواداگینی (۲۰۰۳، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷) با انجام مطالعات آزمایشگاهی، اثر تراز غوطه‌وری و عدد فرود عرشه را بر ضرایب نیروی متوسط وارد شده بر عرشه پل، مطالعه کرده‌اند. نتایج آنها نشان داد که مقادیر آزمایشگاهی متوسط زمانی ضرایب نیروی به دست آمده برای مقطع مستطیلی در جریان نامحدود، تفاوت قابل ملاحظه‌ای با وضعیت قرار گرفتن آن در جریان با سطح آزاد دارد. پژوهشگران دیگر نشان داده‌اند که بدترین وضعیت برای پایداری سازه پل، هنگامی رخ می‌دهد که تراز سطح آب بر روی سازه آن اندک باشد که این وضعیت در عمل با بسامد بالایی روی می‌دهد. در وضعیت تراز کم سطح آب بر روی سازه مستغرق، ضرایب نیروی متوسط به‌طور قابل ملاحظه‌ای

بیشتر از مقادیر متناظر آنها در جریان نامحدود است (مالاواسی و همکاران (۲۰۰۴)). استفاده از مدل‌های عددی در شبیه‌سازی جریان، سبب کاهش هزینه‌های زیاد مدل‌های آزمایشگاهی می‌شود. یو و کریم (۱۹۹۸) به منظور بررسی تغییرات پدیده جدایی جریان بر اثر افزایش نسبت طول به عرض مقطع مستطیلی، میدان جریان اطراف مقطع مستطیلی با نسبت طول به عرض بین ۱ و ۴ را با بهره‌گیری از مدل آشفتگی LES به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. شیمادا و ایشیارا (۲۰۰۲) ساختار غیردائمی گردابه‌ها را در ناحیه انتهایی مقطع مستطیلی با مقادیر مختلف نسبت طول به عرض، با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ اصلاح شده شبیه‌سازی کردند. لیاو (۲۰۰۵) میدان جریان اطراف یک مقطع مستطیلی را با بهره‌گیری از مدل‌های آشفتگی LES و DES شبیه‌سازی کرد. در این پژوهشها میدان جریان باد اطراف مقطع مستطیلی شبیه‌سازی عددی شده و شرایط جریان نامحدود است. اما هنگامی که سیال مورد مطالعه آب باشد، تراز غوطه‌وری یا به بیان دیگر عمق آب بر روی مقطع تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میدان جریان اطراف مقطع و بارهای هیدرودینامیکی وارد بر آن خواهد داشت. مالاواسی و تراباکچای (۲۰۰۸) با بهره‌گیری از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG، اثر تغییر فاصله مقطع مستطیلی از کف کانال را بر میدان جریان اطراف مقطع و بارهای هیدرودینامیکی وارد بر آن در تراز غوطه‌وری ثابت مطالعه کردند. پژوهشگران FHWA^۱ (۲۰۰۹) با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و LES، اثر تغییر تراز غوطه‌وری را بر بارهای هیدرودینامیکی وارد بر سه نوع عرشه پل مختلف شبیه‌سازی کردند. حمزئی و همکاران (۱۳۸۹) با بهره‌گیری از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG و روش شبیه‌سازی سطح آزاد VOF، اثر تغییر تراز

1. Federal Highway Administration

نیست و باید با استفاده از مدل آشفتگی مناسب، تنش‌های رینولدز محاسبه شوند. در این مقاله از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای $k-\epsilon$ استاندارد، $k-\epsilon$ RNG و $k-\epsilon$ Realizable استفاده می‌شود. در این مدل‌ها، یک معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی (k) و یک معادله انتقال برای اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی (ϵ) حل می‌شود. تفاوت سه مدل آشفتگی بالا بیشتر در معادله ϵ است. مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد در مقادیر بزرگ عدد رینولدز بیشتر استفاده می‌شود و در استخراج معادلات k و ϵ برای آن چنین فرض شده که جریان کاملاً متلاطم بوده و اثر لزجت ملکولی بسیار ناچیز است. در مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG یک جمله اضافی به معادله ϵ وارد می‌شود که باعث افزایش دقت محاسبه در جریان‌های کرنشی می‌شود. مدل آشفتگی Realizable $k-\epsilon$ نیز دو تفاوت مهم با مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد دارد، از جمله تعیین رابطه جدیدی برای محاسبه لزجت گردابه‌ای و اضافه شدن یک جمله چشمه به معادله ϵ که تغییرات چرخش جریان را در آن منظور کند.

همان‌گونه که پیشتر بیان شد، برای شبیه‌سازی سطح آزاد از روش VOF و روش سطح صلب استفاده شده است. در روش سطح صلب میدان جریان فقط شامل فاز آب است و با اعمال شرط مرزی تقارن در سطح آزاد، شبیه‌سازی انجام می‌شود. در روش VOF از یک تابع متغیر به نام α استفاده می‌شود که جزء حجم آب در سلول محاسباتی است. α برابر یک یعنی پر بودن سلول از آب و α برابر صفر یعنی سلول پر از هوا. برای $0 < \alpha < 1$ درصدی از سلول حاوی آب و درصدی از آن دارای هوا است. بنابراین با در نظر گرفتن سطح آزاد در جزء حجمی معین می‌توان سطح آزاد جریان را مشخص کرد. در تحقیق حاضر، سطح آزاد جریان در جزء حجمی آب برابر ۰/۵ تعریف شده است.

غوطه‌وری را بر ضریب نیروی درگ وارد بر مقطع مستطیلی مطالعه کردند.

در مقاله حاضر، میدان متوسط جریان آشفته در اطراف عرشه پل و همچنین ضریب نیروی درگ متوسط وارد بر آن در ترازهای مختلف غوطه‌وری با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت نسخه 12.0.16 و مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، $k-\epsilon$ RNG و $k-\epsilon$ Realizable شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی‌ها از روش‌های VOF و سطح صلب^۱ برای شبیه‌سازی سطح آزاد استفاده شده است. از طرح‌های بازسازی^۲ و حجم محدود^۳ به‌منظور تعیین موقعیت سطح آزاد در روش VOF استفاده شده و نتایج حاصل مقایسه شده است.

۲- معادلات حاکم بر جریان

قوانین حاکم بر جریان عبارتند از قانون بقای جرم و بقای مومنت که در حالت جریان آشفته و به‌صورت متوسط‌گیری شده در زمان، معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز به شکل زیر از آنها استخراج می‌شود:

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \quad (2)$$

$-\frac{\partial(p)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial(-\rho u'_i u'_j)}{\partial x_j}$
که در آن، u_i مؤلفه سرعت در جهت x_i ($i, j = 1, 2$)، μ به‌ترتیب برای جهت‌های x و y ، p فشار، ρ چگالی، $\overline{\rho u'_i u'_j}$ لزجت دینامیکی و $\overline{\rho u'_i u'_j}$ تنش‌های رینولدز است. این معادلات سه مجهول شامل مؤلفه‌های سرعت در دو جهت (u, v) و فشار دارد. از طرفی معادله مومنت سه مؤلفه مجهول تنش رینولدز دارد، لذا سیستم معادلات فوق کامل

1. Rigid Lid
2. Reconstruction based schemes
3. Finite volume discretization schemes

مختلف گسسته‌سازی، معادلات جبری گسسته می‌شوند. به‌منظور تهیه هندسه میدان جریان و شبکه‌بندی آن از نرم‌افزار پیش‌پردازنده گمبیت استفاده شده است. از طرح پرست^۳ برای گسسته‌سازی فشار، طرح کوئیک برای گسسته‌سازی عبارت‌های جابجایی معادلات مومنت، طرح آپ ویند مرتبه اول برای گسسته‌سازی عبارت‌های جابجایی معادلات آشفتگی و از الگوریتم پیزو^۴ برای مرتبط کردن سرعت و فشار استفاده شده است. به‌منظور جلوگیری از واگرایی حل، ضرایب زیر تخفیف کوچکتر از یک برای فشار، مومنت، انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ استهلاك انرژی جنبشی آشفتگی (ε) مورد استفاده قرار گرفته است. گام زمانی برای حل مساله برابر ۰/۰۱ ثانیه انتخاب شده است. در ضمن معیار همگرایی، رسیدن به مقدار ثابت باقیمانده‌های خطای نسبی^۵ نیست، بلکه محاسبات تا زمان دائمی شدن حل ادامه می‌یابد و در لحظه دائمی شدن باقیمانده‌های خطای نسبی مقداری بین ۰/۰۰۰۱ و ۰/۰۰۰۰۱ خواهند داشت.

۴- مشخصات میدان حل و شبکه‌بندی

در این مقاله برای صحت‌سنجی مدل عددی از نتایج آزمایشهای مالاواسی و گواداگینی (۲۰۰۳) و مالاواسی و نگری (۲۰۰۸) استفاده شده است. در مدل‌سازی آزمایشگاهی، کانال روباز مستطیلی از جنس پلکسی گلاس با عرض ۰/۵ متر، طول ۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر استفاده شده است. از مقطع مستطیلی با سطح صاف و گوشه‌های تیز برای مدل‌سازی عرشه پل استفاده شده که این مقطع به دیوارهای جانبی کانال متصل شده و در فاصله ۳/۳۵ متری از مقطع ورودی و ۰/۱۴ متری از کف

با حل معادله پیوستگی زیر برای جزء حجمی آب α، جزء حجمی در کل میدان حل تعیین می‌شود:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

روش‌های متعددی برای حل این معادله وجود دارد که شامل طرح‌های بازسازی و حجم محدود می‌شود. طرح‌های بازسازی موجود در نرم‌افزار فلوئنت عبارت است از: طرح بازسازی هندسی^۱ و طرح دهنده و گیرنده^۲. در پژوهش حاضر از طرح بازسازی هندسی استفاده شده است. در طرح بازسازی هندسی جریان به‌صورت غیردائمی تحلیل می‌شود. در استفاده از این طرح، نرم‌افزار فلوئنت، با استفاده از طرح‌های درون‌یابی استاندارد، شار وجوه سلول‌هایی را که پر از آب یا پر از هوا باشند محاسبه می‌کند و برای محاسبه شار وجوه سلول‌هایی که در نزدیکی سطح مشترک دو فاز آب و هوا قرار دارند، از طرح بازسازی هندسی استفاده می‌کند. در این طرح شیب سطح بین آب و هوا در هر سلول جریان به‌صورت خطی فرض شده و سرعت محلی در هر سلول بر اساس شیب سطح به‌دست آمده از دو سلول مجاور تعیین می‌شود. در صورت استفاده از طرح‌های حجم محدود، نرم‌افزار فلوئنت با استفاده از این طرح‌ها شار وجوه تمامی سلول‌ها را -از جمله سلول‌هایی که در نزدیکی سطح مشترک دو فاز آب و هوا قرار دارند- محاسبه می‌کند.

۳- حل عددی معادلات

همان‌طور که گفته شد برای حل معادلات از نرم‌افزار شبیه‌سازی جریان فلوئنت استفاده شده است. این نرم‌افزار کل میدان جریان را به صورت حجم‌های مجزای کنترل در نظر می‌گیرد. از معادلات حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال‌گیری شده و با استفاده از طرح‌های

3. PRESTO
4. PISO
5. Residuals

1. Geometric Reconstruction Scheme
2. Donor-Acceptor Scheme

افزایش شبکه انتخاب شد. شکل ۱ میدان حل جریان و نحوه شبکه‌بندی آن را در بالادست و پایین‌دست مقطع مستطیلی در شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده نشان می‌دهد. ابعاد شبکه یکنواخت مربعی در اطراف مقطع مستطیلی به نحوی انتخاب می‌شود که نتایج شبیه‌سازی عددی مستقل از ابعاد شبکه باشد. برای انتخاب ابعاد مناسب شبکه، نتایج میدان جریان و ضریب نیروی درگ متوسط شبیه‌سازی شده با مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد، در تراز غوطه‌وری برابر ۲ بررسی شد.

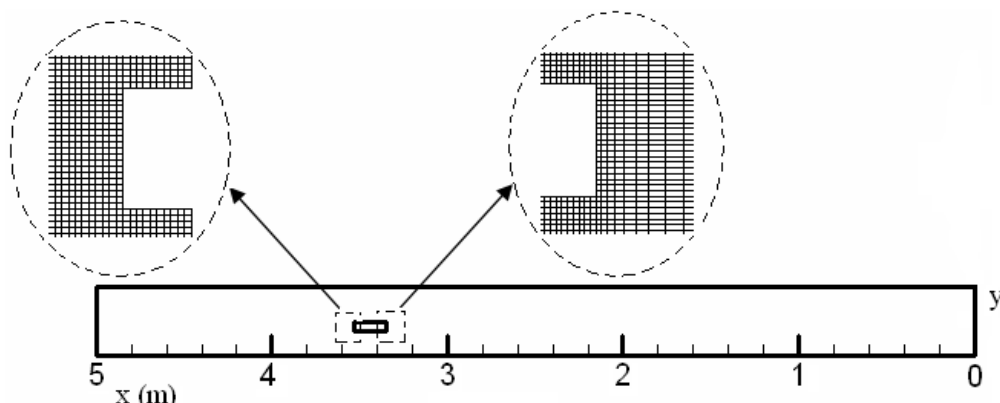
تراز غوطه‌وری (h^*) به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$h^* = \frac{h - h_b}{s} \quad (4)$$

که در آن s ضخامت مقطع، h_b ارتفاع مقطع از کف کانال و h عمق آب در فاصله ۶۰ سانتی‌متری از بالادست مقطع است. بر اساس رابطه (۴) در صورتی که تراز غوطه‌وری کمتر از یک باشد، مقطع دارای غرق‌شدگی جزئی (سطح آب در تراز بین قسمتهای فوقانی و تحتانی مقطع واقع شده) و در صورتی که این مقدار بزرگتر از یک باشد، دارای غرق‌شدگی کامل است.

($h_b/s = 2.33$)، قرار گرفته است. طول مقطع (l) برابر ۰/۱۸ متر، ضخامت آن (s) برابر ۰/۰۶ متر و نسبت طول به ضخامت (l/s) برابر ۳ است.

در مقاله حاضر، با توجه به مستقیم بودن کانال آزمایشگاهی و تغییر نکردن هندسه در عرض کانال و عرض مقطع مستطیلی واقع شده در آن، شبیه‌سازی عددی به صورت دو بعدی در قائم انجام شده است. شبکه‌بندی میدان حل در اطراف مقطع مستطیلی در عمق و در طول به صورت یکنواخت است. در طول کانال با توجه به وجود جریان یکنواخت در بالادست مقطع، شبکه‌بندی به طرف بالادست با ضریب ۱/۲ افزایش یافته است، اما به دلیل وجود جریان‌های گردابه‌ای در پایین‌دست مقطع، شبکه‌بندی تا فاصله ۲۰ سانتی‌متر به طرف پایین‌دست مقطع یکنواخت و پس از آن با ضریب ۱/۲ به طرف پایین‌دست افزایش می‌یابد. لازم است ذکر شود که برای انتخاب ضریب افزایش شبکه به سمت بالادست و پایین‌دست، پروفیل سرعت در مقطعی در بالادست و پایین‌دست مقطع در دو حالت با ضریب افزایش شبکه ۱/۰۵ و ۱/۲ با یکدیگر مقایسه شد که در نهایت به دلیل تطابق پروفیل‌های سرعت در دو حالت بالا، برای کاهش زمان اجرای مدل عددی ضریب ۱/۲ به عنوان ضریب



شکل ۱ میدان حل جریان و نحوه شبکه‌بندی میدان در بالادست و پایین‌دست مقطع مستطیلی

ضریب نیروی درگ نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_D = F_D / (0.5 \rho U_0^2 s) \quad (5)$$

در این رابطه F_D نیروی درگ متوسط در واحد عرض مقطع، ρ چگالی سیال، U_0 سرعت متوسط جریان ورودی و C_D ضریب نیروی درگ است. نیروی درگ از دو بخش تشکیل می‌شود، بخشی از آن ناشی از اختلاف فشار (درگ فشاری یا شکلی) و بخشی دیگر ناشی از تنش‌های برشی (درگ اصطکاکی یا لزجی) است. نیروی درگ فشاری برایند نیروهای فشاری وارد بر وجوه قائم بالادست و پایین‌دست مقطع در جهت جریان و نیروی درگ اصطکاکی برایند نیروهای مماسی وارد بر وجوه افقی فوقانی و تحتانی مقطع در جهت جریان است. لازم است ذکر شود که در مطالعه آزمایشگاهی، ضریب نیروی درگ در شرایط غرق‌شدگی جزئی و کامل بر اساس مساحت کل وجه بالادست مقطع محاسبه شده و لذا در مطالعه حاضر نیز به‌منظور محاسبه ضریب نیروی درگ در هر دو حالت غرق‌شدگی، کل ضخامت مقطع در نظر گرفته می‌شود.

در این مطالعه، ابعاد شبکه یکنواخت مربعی در اطراف مقطع برابر 0.35 ، 0.3 و 0.25 سانتی‌متر استفاده شد. بر طبق نتایج به‌دست آمده، مقادیر ضریب نیروی درگ شبیه‌سازی شده به‌ترتیب برابر $1/959$ ، $1/975$ و $1/976$ محاسبه شد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی مالاواسی و

گواداگینی (۲۰۰۳) در تراز غوطه‌وری برابر ۲، ضریب نیروی درگ برابر $1/98$ است. بنابراین می‌توان گفت که با تغییر ابعاد شبکه یکنواخت مربعی در اطراف مقطع از 0.3 به 0.25 سانتی‌متر، ضریب نیروی درگ متوسط شبیه‌سازی شده تقریباً ثابت مانده و تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. لذا برای کاهش زمان اجرای مدل عددی، بعد شبکه یکنواخت مربعی در اطراف مقطع مستطیلی برابر 0.3 سانتی‌متر انتخاب شده است. لازم است ذکر شود که میدان جریان در اطراف مقطع مستطیلی نیز در ابعاد شبکه برابر 0.3 سانتی‌متر و 0.25 سانتی‌متر تقریباً یکسان و مشابه است. در جدول ۱ تعداد سلول‌ها در شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است.

همان‌گونه که دیده می‌شود در تمامی شبیه‌سازی‌ها تعداد سلول‌ها در جهت x برابر است، اما تعداد سلول‌ها در جهت y به تراز غوطه‌وری و روش شبیه‌سازی سطح آزاد بستگی دارد. در صورت استفاده از روش سطح صلب برای شبیه‌سازی سطح آزاد، میدان حل فقط شامل فاز آب است.

در این حالت به‌دلیل وجود جریان‌های گردابه‌ای بر روی وجوه افقی مقطع، شبکه‌بندی از وجه افقی فوقانی و تحتانی تا فاصله ۳ سانتی‌متر در جهت سطح آزاد و کف کانال یکنواخت و پس از آن با ضریب $1/2$ در جهت‌های فوق افزایش می‌یابد. در صورت استفاده از شبیه‌سازی سطح آزاد VOF، میدان حل شامل فاز آب و هوا است.

جدول ۱ تعداد سلول‌ها در شبیه‌سازی‌ها

h^*	۰/۸	۱	۱/۲	۱/۴	۱/۶	۱/۸	۲	۲/۵	۴	۵
$x \times y$	124×53	124×53	124×46	124×50	124×54	124×58	124×59	124×61	124×65	124×67

در این حالت شبکه‌بندی از سطح آزاد در جهت y با ضریب $1/2$ افزایش و از وجه افقی تحتانی به دلیل وجود جریان گردابه‌ای تا فاصله ۳ سانتی‌متری در جهت کف کانال یکنواخت و پس از آن با ضریب $1/2$ در جهت فوق افزایش می‌یابد. نحوه انتخاب ضریب افزایش شبکه در عمق مانند جهت طولی است.

۵- شرایط مرزی

با توجه به آن که برای صحت‌سنجی مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی مالاواسی و گواداگینی (۲۰۰۳) و مالاواسی و نگری (۲۰۰۸) استفاده شده، لازم است شرایط مرزی در مدل عددی منطبق بر آزمایشهای انجام شده باشد. در آزمایشهای انجام شده عدد فرود عرشه (Fr_s) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Fr_s = U_0 / (gs)^{0.5} \quad (6)$$

که در آن g شتاب گرانش است. با توجه به ثابت بودن g ، s و با مشخص بودن عدد فرود عرشه، سرعت در مرز ورودی (U_0) به دست می‌آید. اما با توجه به ثابت بودن ارتفاع مقطع از کف کانال (h_b) و مشخص بودن تراز غوطه‌وری مقطع (h^*) در آزمایش‌های فوق و از رابطه (۴)، عمق آب در بالادست مقطع مستطیلی (h) محاسبه می‌شود. انرژی جنبشی آشفتگی ورودی (k_0) و نرخ استهلاك انرژی جنبشی آشفتگی ورودی (ε_0) از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$k_0 = \frac{3}{2} (T_u U_0)^2 \quad (7)$$

$$\varepsilon_0 = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (8)$$

که در آن T_u شدت آشفتگی ورودی است که در آزمایشهای انجام شده برابر ۱۴٪ برآورد شده است، C_μ ثابتی تجربی برابر ۰/۰۹ و l طول آشفتگی است که ۰/۰۷

برابر قطر هیدرولیکی کانال در نظر گرفته می‌شود. در کف کانال و جدارهای مقطع، شرط مرزی دیواره به کار رفته است. در شبیه‌سازی سطح آزاد با روش VOF، در انتهای کانال یک سرریز قرار داده شده که با تغییر ارتفاع آن، تراز غوطه‌وری برابر با مقادیر آزمایشگاهی تنظیم می‌شود. در قسمت بالای سرریز، شرط مرزی فشار خروجی و برای مدل‌سازی سرریز از شرط مرزی دیواره استفاده شده است. در مرز فوقانی فاز هوا، شرط مرزی تقارن و همچنین سرعت در ورودی فاز هوا برابر ۰/۰۰۰۰۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی سطح آزاد با روش سطح صلب، در خروجی کانال از شرط مرزی جریان خروجی^۱ استفاده شده است. در مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد، $k-\varepsilon$ RNG و $k-\varepsilon$ Realizable، برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در نزدیکی مرزهای جامد از تابع استاندارد دیواره استفاده می‌شود. این تابع، مانند نوعی پل، پاسخ‌های نقاط داخلی میدان را به نواحی نزدیک دیوار مرتبط می‌سازد و بدین ترتیب از استفاده از شبکه ریز در نواحی با گرادیان شدید (نزدیک دیواره) پرهیز می‌شود.

۶- شبیه‌سازی سطح آزاد

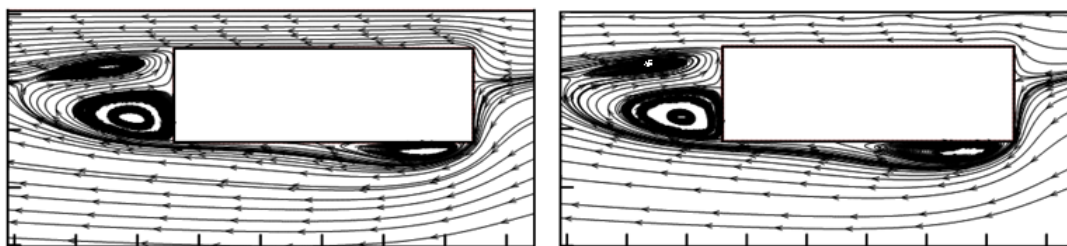
در این بخش به منظور مقایسه الگوی جریان در دو روش شبیه‌سازی سطح آزاد، از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شده است. شکل ۲ میدان متوسط جریان شبیه‌سازی شده در اطراف عرشه را در تراز غوطه‌وری $1/4$ و با دو روش شبیه‌سازی سطح آزاد VOF و سطح صلب نشان می‌دهد. در این شکل و شکل‌های بعدی، مقیاس طولی در جهت‌های افقی و قائم یکسان است. لازم است ذکر شود که در این تراز غوطه‌وری، از طرح

در این حالت طرح بازسازی هندسی مقدار ضریب نیروی درگ را بهتر از طرح کوئیک شبیه‌سازی کرده است. به‌منظور بررسی علت اختلاف زیاد بین این دو طرح، در شکل ۳ میدان جریان و الگوی اختلاط آب و هوای شبیه‌سازی شده با استفاده از دو طرح بالا در $h^* = 1$ مقایسه شده است. در این حالت، خطای نسبی در شبیه‌سازی ضریب نیروی درگ در طرح بازسازی هندسی و طرح کوئیک به‌ترتیب برابر $12/78$ و $37/44$ درصد است.

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در طرح بازسازی هندسی بر روی وجه افقی تحتانی و وجه قائم پایین‌دست گردابه‌هایی تشکیل شده و بر روی وجه قائم بالادست گردابه‌ای مشاهده نمی‌شود. همچنین در این طرح هیچ‌گونه اختلاط آب و هوا بر روی وجوه مقطع دیده نمی‌شود. در طرح کوئیک بر روی وجه قائم پایین‌دست یک گردابه تشکیل شده و بر روی وجه افقی تحتانی گردابه‌ای تشکیل نمی‌شود. ضمناً در این طرح اختلاط آب و هوا بر روی وجه قائم بالادست باعث شده که حتی بر روی این وجه نیز گردابه تشکیل شود که این مسأله باعث می‌شود که فشار وارد شده بر وجه مذکور به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد. لذا اختلاف فشار بین وجوه قائم بالادست و پایین‌دست در طرح بازسازی هندسی بیشتر از طرح کوئیک است.

بازسازی هندسی برای حل معادله VOF استفاده شده و نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده تطابق نتایج طرح‌های بازسازی هندسی و کوئیک است. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، الگوی جریان در اطراف عرشه پل در دو شبیه‌سازی سطح آزاد VOF و سطح صلب مشابه است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که در هر دو روش بالا، دقت شبیه‌سازی عددی ضریب نیروی درگ متوسط وارد شده بر عرشه در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مناسب است، به‌طوری‌که خطای نسبی روش VOF، برابر $1/6$ درصد و خطای نسبی روش سطح صلب برابر $1/63$ درصد است (خطای نسبی با تقسیم قدر مطلق اختلاف مقادیر ضریب نیروی درگ عددی و آزمایشگاهی بر قدر مطلق ضریب نیروی درگ آزمایشگاهی محاسبه شده است). لذا در عدد فرود عرشه برابر $0/26$ و در شرایطی که عرشه به‌طور کامل توسط جریان غرق می‌شود ($h^* > 1$)، به‌دلیل تغییر ناچیز سطح آزاد و به‌منظور صرفه‌جویی در زمان اجرای مدل عددی، می‌توان از روش سطح صلب استفاده کرد.

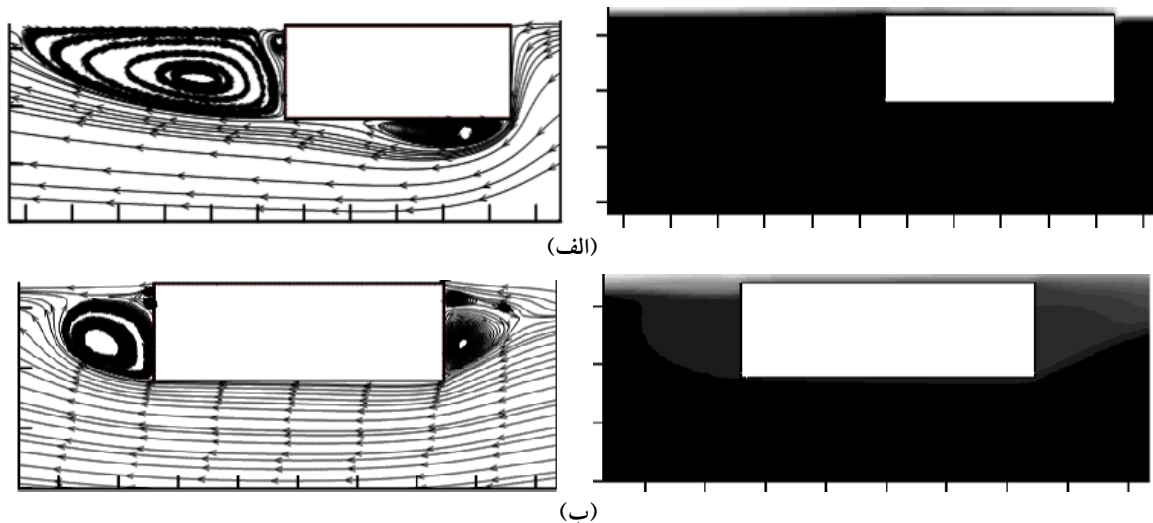
اما نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که برای $h^* \leq 1$ ، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین نتایج طرح‌های بازسازی هندسی و کوئیک در شبیه‌سازی سطح آزاد جریان به روش VOF وجود دارد.



ب) روش سطح صلب

الف) روش VOF

شکل ۲ میدان متوسط جریان در اطراف عرشه برای $h^* = 1.4$ و $Fr_s = 0.26$



شکل ۳ میدان جریان و الگوی اختلاط آب و هوای شبیه‌سازی شده با روش VOF در $h^* = 1$ و $Fr_s = 0.26$
 (الف) طرح بازسازی هندسی (ب) طرح کوئیک

خطای نسبی روش سطح صلب برابر ۲۲/۳۷ درصد، الگوی میدان جریان در دو روش بالا نیز مقداری متفاوت است. شکل ۴ میدان متوسط جریان شبیه‌سازی شده در اطراف عرشه را در تراز غوطه‌وری برابر ۱، در دو روش شبیه‌سازی سطح آزاد VOF و سطح صلب نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در مدل‌سازی با روش VOF، بر روی وجه قائم پایین‌دست عرشه، علاوه بر وجود یک گردابه بزرگ، یک گردابه کوچک نیز تشکیل شده است، در حالی که در روش سطح صلب، گردابه کوچک شبیه‌سازی نشده است. لذا با توجه به دقت بیشتر روش VOF با طرح بازسازی هندسی در شبیه‌سازی ضریب نیروی درگ وارد شده بر عرشه پل در ترازهای پایین غوطه‌وری ($h^* \leq 1$) و عدد فرود عرشه برابر ۰/۲۶، برای شبیه‌سازی سطح آزاد از این روش استفاده شده است. با افزایش عدد فرود، به دلیل تغییر سطح آزاد بر روی عرشه، امکان استفاده از روش سطح صلب برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان وجود ندارد و برای شبیه‌سازی سطح آزاد باید از مدل‌های دو فازی استفاده شود. در شکل ۵ پروفیل سطح آزاد شبیه‌سازی شده با

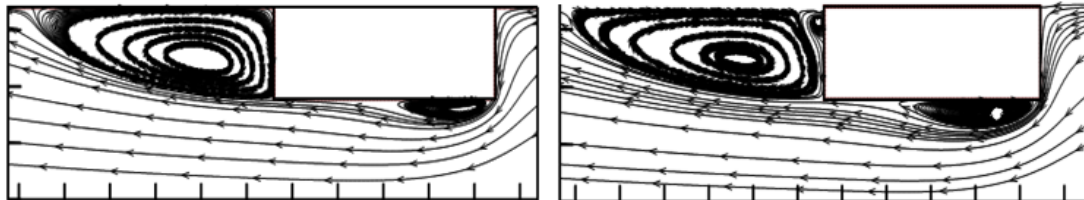
از آنجا که منشأ اصلی نیروی درگ وارد شده بر عرشه اختلاف فشار وارد بر وجوه قائم بالادست و پایین‌دست آن است، بنابراین ضریب نیروی درگ در طرح بازسازی هندسی بیشتر از طرح کوئیک است. بنابر این به نظر می‌رسد که در حالت $h^* \leq 1$ استفاده از طرح‌های حجم محدود مانند کوئیک درست نیست. در ادامه، دقت روش شبیه‌سازی سطح آزاد VOF با استفاده از طرح بازسازی هندسی با روش سطح صلب در ترازهای غوطه‌وری پایین ($h^* \leq 1$) مقایسه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که در تراز غوطه‌وری برابر ۰/۸، با وجود تشابه الگوی میدان جریان اطراف عرشه در حالت شبیه‌سازی سطح آزاد با روش VOF و سطح صلب، دقت روش VOF در پیش‌بینی ضریب نیروی درگ وارد بر عرشه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از روش سطح صلب است. در این حالت، خطای نسبی روش VOF برابر ۲۰/۹۸ درصد و خطای نسبی روش سطح صلب برابر ۳۰ درصد است. در تراز غوطه‌وری برابر ۱، علاوه بر بیشتر بودن دقت روش VOF در پیش‌بینی ضریب نیروی درگ وارد شده بر عرشه (خطای نسبی روش VOF، ۱۲/۷۸ درصد و

مطالعه شده است. در جدول ۲ متوسط زمانی ضرایب نیروی درگ شبیه‌سازی شده با مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد، $k-\varepsilon$ RNG و $k-\varepsilon$ Realizable و مقادیر متناظر آزمایشگاهی برای ترازهای مختلف غوطه‌وری ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، در حالتی که عرشه بطور کامل در جریان غرق نشده ($h^* \leq 1$)، مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد، ضریب نیروی درگ وارد شده بر عرشه را دقیق‌تر برآورد کرده است.

روش VOF و طرح‌های بازسازی هندسی و کوئیک در تراز غوطه‌وری برابر ۲ و عدد فرود عرشه برابر ۰/۸ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

۷- صحت‌سنجی و نتایج مدل عددی

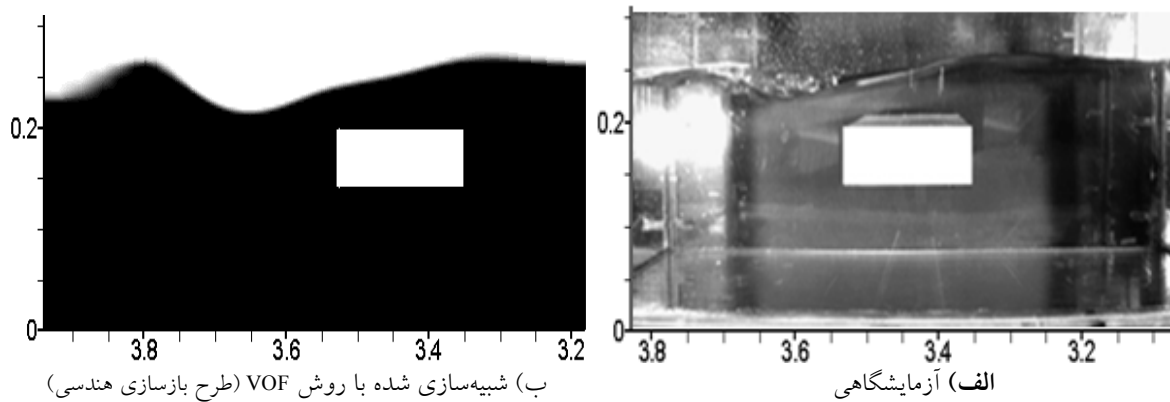
در این بخش نخست توانایی مدل‌های مختلف آشفتگی در شبیه‌سازی اثر تغییر تراز غوطه‌وری بر ضریب نیروی درگ (C_D) وارد شده بر مقطع مستطیلی در عدد فرود عرشه (Fr_s) برابر ۰/۲۶ (عدد رینولدز برابر ۱۲۰۰۰)،



(ب) روش سطح صلب

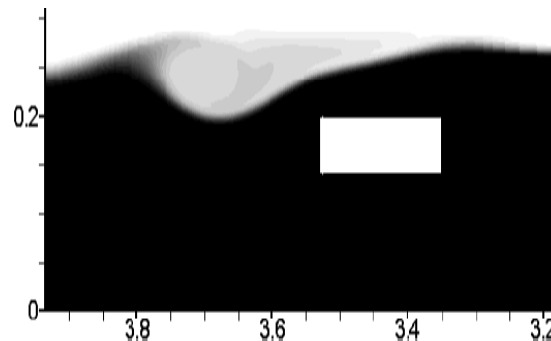
(الف) روش VOF

شکل ۴ میدان متوسط جریان شبیه‌سازی شده در اطراف عرشه در $h^* = 1$



(الف) آزمایشگاهی

(ب) شبیه‌سازی شده با روش VOF (طرح بازسازی هندسی)



(ج) شبیه‌سازی با روش کوئیک

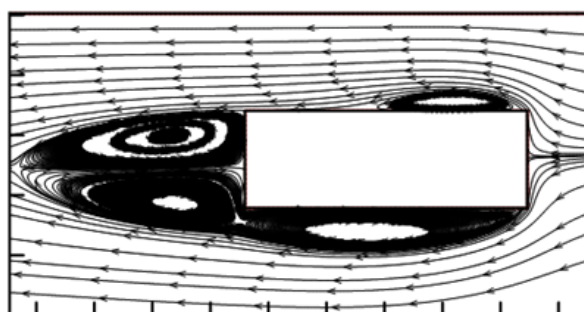
شکل ۵ پروفیل سطح آزاد

در ترازهای غوطه‌وری $1 < h^* \leq 2.5$ (به‌جز تراز غوطه‌وری معادل ۲) نتایج مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG، تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. در تراز غوطه‌وری برابر ۲، به خلاف انتظار، مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد، دقت بیشتری دارد. در این حالت با توجه به نتایج آزمایشگاهی، بر روی سطح آزاد جریان اختلاط آب و هوا وجود دارد که طرح بازسازی هندسی توانایی

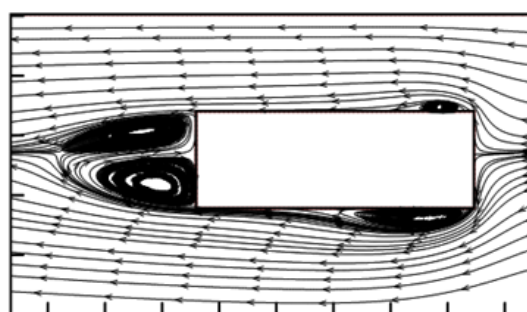
شبیه‌سازی این اختلاط را ندارد، در حالی که طرح کوئیک به نحو مناسبی این اختلاط را شبیه‌سازی کرده است. به‌منظور بررسی علت بالاتر بودن دقت مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد در پیش‌بینی ضریب نیروی درگ وارد شده بر عرشه در تراز غوطه‌وری برابر ۲، در شکل ۶ میدان جریان شبیه‌سازی شده با مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $k-\varepsilon$ RNG مقایسه شده است.

جدول ۲ مقادیر ضریب درگ آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در آزمایشهای مالاواسی و گواداگینی ($Fr_s = 0.26$) با (20.3)

		مقادیر ضریب درگ شبیه‌سازی شده با مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$			درصد خطای نسبی ضریب درگ شبیه‌سازی شده با مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$		
h^*	ضریب درگ آزمایشگاهی	Standard	RNG	Realizable	Standard	RNG	Realizable
۰/۸	۱/۴۳	۱/۷۳	۲/۰۹	۲/۰۰	۲۰/۹۸	۴۶/۱۵	۳۹/۸۶
۱/۰	۲/۱۹	۲/۴۷	۳/۱۶	۳/۲۱	۱۲/۷۸	۴۴/۲۹	۴۶/۵۸
۱/۲	۲/۸۱	۲/۶۹	۲/۸۱	۲/۷۱	۴/۲۷	۰/۰۰	۳/۵۶
۱/۴	۲/۴۶	۲/۵۰	۲/۴۸	۲/۸۸	۱/۶۳	۰/۸۱	۱۷
۱/۶	۲/۲۸	۲/۳۷	۲/۲۵	۲/۲۱	۳/۹۵	۱/۳۲	۳/۰۷
۱/۸	۲/۱۶	۲/۲۶	۲/۱	۲/۰۷	۴/۶۳	۲/۷۸	۴/۱۷
۲/۰	۱/۹۸	۱/۹۷	۲/۰۸	۲/۰۶	۰/۵۰	۵/۰۵	۴/۰۴
۲/۵	۱/۸۸	۲/۰۳	۱/۷۹	۱/۷۸	۷/۹۸	۴/۷۹	۵/۳۲
۴	۱/۵۴	۱/۷۹	۱/۵۵	۱/۵۴	۱۶/۲۳	۰/۶۵	۰/۰۰
۵	۱/۳۶	۱/۶۴	۱/۴۵	۱/۴۴	۲۰/۱	۶/۶۲	۵/۸۸



ب) $k-\varepsilon$ RNG



الف) $k-\varepsilon$ استاندارد

شکل ۶ میدان متوسط جریان در اطراف عرشه در $h^* = 2$ ، شبیه‌سازی شده با مدل‌های آشفتگی مختلف

در تحقیق حاضر نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که سهم درگ اصطکاکی بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است که علت آن می‌تواند پدیده جدایی جریان و در نتیجه تشکیل گردابه بر روی وجوه افقی و عدم وجود زبری باشد. لذا نیروی درگ وارد شده بر عرشه بیشتر ناشی از اختلاف فشار در وجوه قائم بالادست و پایین‌دست آن است (درگ فشاری). همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ RNG، ابعاد گردابه‌های وجوه افقی فوقانی و تحتانی عرشه را بزرگتر از مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ استاندارد، پیش‌بینی کرده است، اما نیروی درگ وارد شده بر وجوه افقی فوقانی و تحتانی عرشه از نوع اصطکاکی است و همان‌طور که پیشتر گفته شد در تحقیق حاضر، مقدار نیروی درگ اصطکاکی ناچیز و قابل چشم‌پوشی است و بر همین اساس ابعاد گردابه‌های وجوه افقی فوقانی و تحتانی عرشه تأثیر چندانی بر ضریب نیروی درگ شبیه‌سازی شده نخواهد داشت. وجود گردابه‌های وجه قائم پایین‌دست باعث ایجاد اختلاف فشار دینامیکی بین وجه قائم بالادست و پایین‌دست عرشه شده و لذا ابعاد این گردابه‌ها تأثیر زیادی بر ضریب نیروی درگ شبیه‌سازی شده خواهد داشت که مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ RNG، طول گردابه‌های وجه قائم پایین‌دست را به اندازه ۵/۶ سانتی‌متر (تقریباً دو برابر) بزرگتر از مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ استاندارد پیش‌بینی کرده است.

به همین دلیل ضریب نیروی درگ شبیه‌سازی شده با مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ RNG، بزرگتر از مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ استاندارد است. از آنجا که مقدار ضریب نیروی درگ شبیه‌سازی شده با مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ استاندارد، به مقدار متناظر آزمایشگاهی نزدیکتر است، می‌توان گفت که مدل آشفته‌گی طول گردابه‌های وجه قائم پایین‌دست را

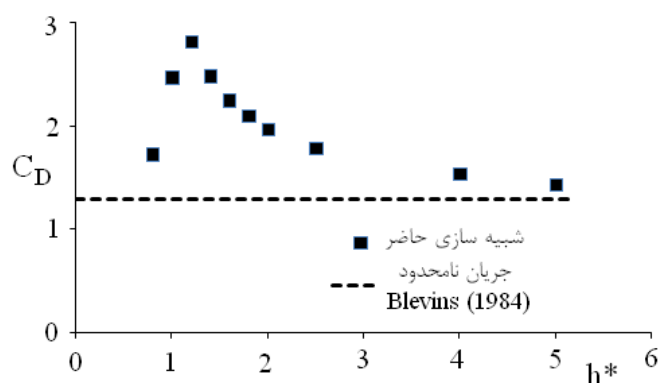
دقیق‌تر شبیه‌سازی کرده است. در ترازهای غوطه‌وری ۴ و ۵ نیز مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ Realizable مقدار ضریب نیروی درگ وارد شده بر عرشه را اندکی بهتر از مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ RNG پیش‌بینی کرده اما دقت مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ استاندارد به طور قابل ملاحظه‌ای پایین‌تر از دو مدل آشفته‌گی فوق است.

بر اساس نتایج بلوینس (۱۹۸۴) در شرایطی که جریان نامحدود در اطراف مقطع با ابعاد مورد نظر در مقاله حاضر برقرار باشد، متوسط ضریب نیروی درگ ثابت می‌شود. در شکل ۷ تغییر متوسط ضریب نیروی درگ شبیه‌سازی شده برای ترازهای مختلف غوطه‌وری، در مقایسه با مقدار ثابت ۱/۳ پیشنهاد شده توسط بلوینس (۱۹۸۴) در شرایط جریان نامحدود، نشان داده شده است. لازم است ذکر شود که در شکل فوق برای شبیه‌سازی ضریب نیروی درگ وارد شده بر عرشه از مدل آشفته‌گی $k-\varepsilon$ RNG استفاده شده که بر طبق جدول ۲ بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی دارد. همان‌گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، در ترازهای غوطه‌وری $1.2 \leq h^*$ ، با افزایش تراز غوطه‌وری، ضریب نیروی درگ افزایش یافته و در تراز غوطه‌وری برابر ۱/۲، به حداکثر رسیده است و سپس با افزایش تراز غوطه‌وری، ضریب نیروی درگ کاهش می‌یابد. در ترازهای غوطه‌وری بالا، ضریب نیروی درگ تغییر ناچیزی داشته و در حال نزدیک شدن به مقدار آن در شرایط جریان نامحدود است. در شرایط جریان نامحدود، تأثیر شرایط مرزی سطح آزاد و کف کانال بر ضریب نیروی درگ بسیار ناچیز بوده و ضریب نیروی درگ مستقل از تراز غوطه‌وری است.

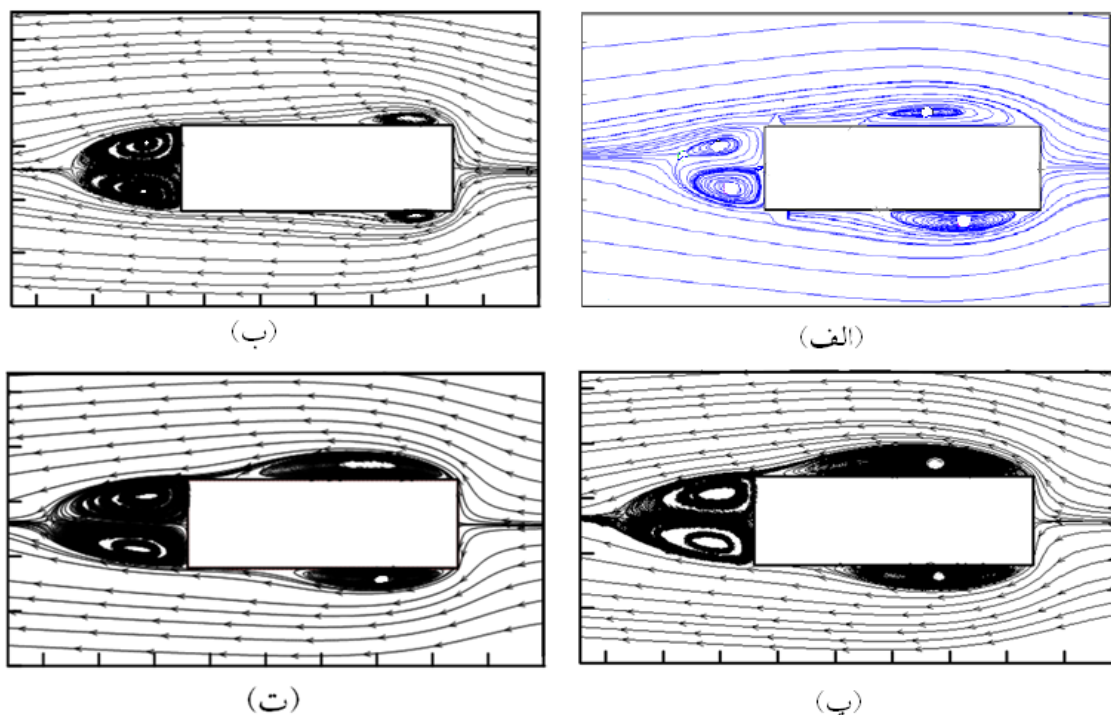
در ادامه نتایج شبیه‌سازی عددی، میدان متوسط جریان شبیه‌سازی شده در اطراف عرشه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. میدان متوسط جریان شبیه‌سازی شده با

انتهای گردابه‌های وجه افقی فوقانی و تحتانی را نسبت به مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد بهتر پیش‌بینی کرده‌اند. در ضمن تمامی مدل‌های آشفتگی، مختصات مرکز گردابه‌های وجه قائم پایین‌دست و همچنین محل نقطه سکون واقع بر وجه قائم بالادست را با دقت تقریباً یکسانی پیش‌بینی کرده‌اند.

مدل‌های مختلف آشفتگی در اطراف عرشه در مقایسه با میدان متوسط جریان آزمایشگاهی در تراز غوطه‌وری برابر ۵ در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در این حالت شرایط جریان نامحدود بوده و میدان جریان در اطراف عرشه تقریباً متقارن است. با توجه به شکل ۸ می‌توان گفت که مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG و Realizable $k-\varepsilon$ مختصات مرکز و



شکل ۷ اثر تغییر تراز غوطه‌وری بر متوسط ضریب نیروی درگ شبیه‌سازی شده در آزمایشها برای $Fr_s = 0.26$

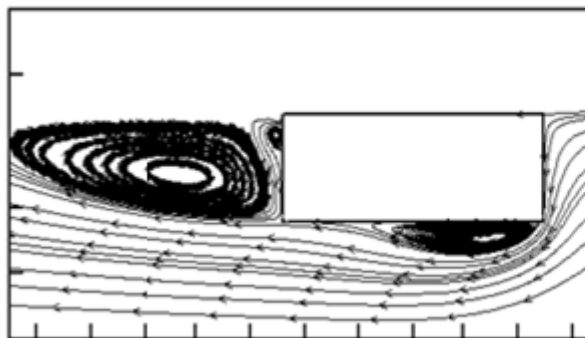


شکل ۸ میدان متوسط جریان اطراف عرشه در $h^* = 5$ و $Fr_s = 0.26$
 (الف) آزمایشگاهی (ب) $k-\varepsilon$ استاندارد (پ) $k-\varepsilon$ RNG (ت) Realizable $k-\varepsilon$

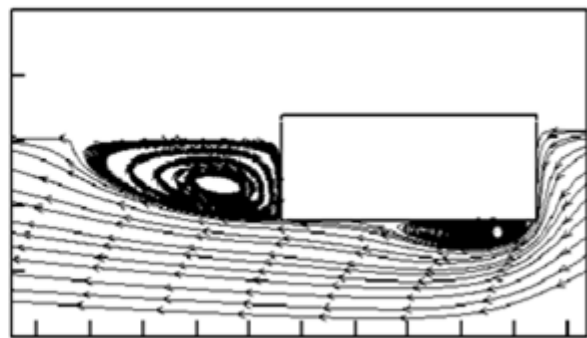
نیروی درگ در این مدل‌های آشفتگی شده است (جدول ۲).

در پایان، اثر تغییر تراز غوطه‌وری بر الگوی میدان متوسط جریان در اطراف عرشه و اثر این الگوی میدان جریان بر ضریب نیروی درگ مطالعه شده است. در شکل ۹ میدان متوسط جریان در اطراف عرشه در ترازهای مختلف غوطه‌وری نشان داده شده است.

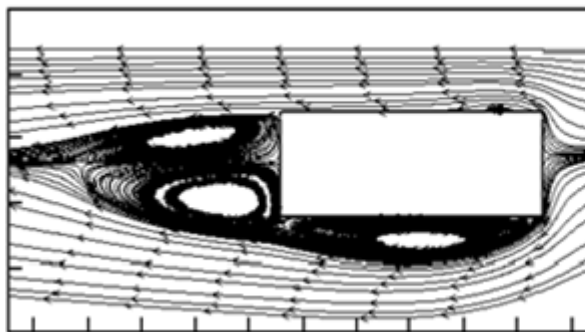
اما مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد فقط مختصات انتهایی گردابه‌های وجه قائم پایین‌دست را نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی اندکی بهتر پیش‌بینی کرده است. در مجموع مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG و $k-\varepsilon$ Realizable میدان متوسط جریان را بهتر شبیه‌سازی کرده‌اند و این موجب پیش‌بینی بهتر ضریب



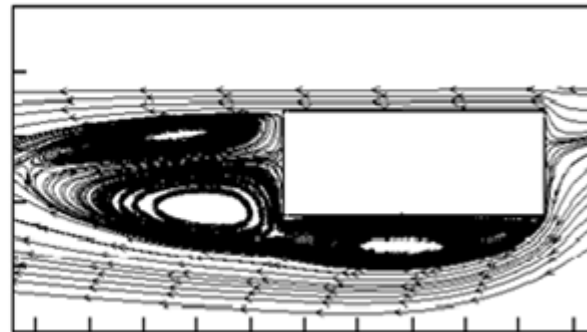
ب) $h^* = 1$



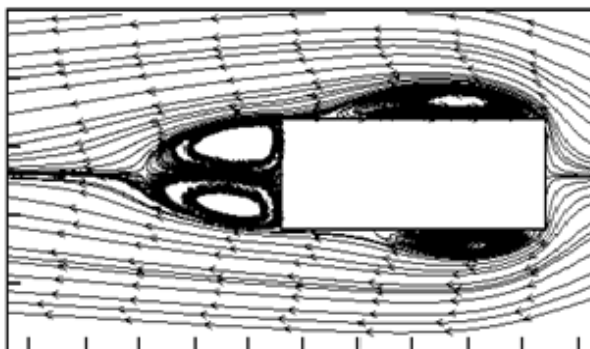
الف) $h^* = 0.8$



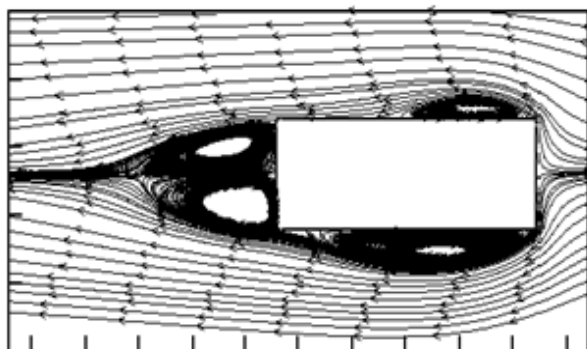
ت) $h^* = 1.6$



پ) $h^* = 1.2$



د) $h^* = 5$



ج) $h^* = 2.5$

شکل ۹ اثر افزایش تراز غوطه‌وری بر میدان متوسط جریان شبیه‌سازی شده آزمایش‌های با $Fr_s = 0.26$

می‌ماند. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای تمامی ترازهای غوطه‌وری همواره یک گردابه در وجه افقی تحتانی عرشه وجود دارد، اما در ترازهای غوطه‌وری کمتر از $1/6$ گردابه‌ای در وجه افقی فوقانی عرشه تشکیل نمی‌شود. در تراز غوطه‌وری برابر $1/6$ یک گردابه کوچک در قسمت ابتدایی وجه افقی فوقانی تشکیل شده و به تدریج با افزایش تراز غوطه‌وری و نزدیک شدن به شرایط جریان نامحدود، ابعاد این گردابه توسعه می‌یابد، به‌طوری‌که در ترازهای غوطه‌وری بالا میدان جریان در مجاورت دو وجه افقی فوقانی و تحتانی عرشه نیز مانند گردابه‌های وجه قائم پایین‌دست آن، متقارن می‌شود.

۸- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، میدان متوسط جریان در اطراف عرشه پل و متوسط زمانی ضریب نیروی درگ وارد شده بر آن با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و با بهره‌گیری از سه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، $k-\epsilon$ RNG و $k-\epsilon$ Realizable شبیه‌سازی شده و از روش‌های VOF و سطح صلب برای شبیه‌سازی سطح آزاد استفاده شده است.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی عددی می‌توان گفت:

- طرح بازسازی هندسی در روش شبیه‌سازی سطح آزاد VOF توانایی شبیه‌سازی اختلاط آب و هوا را ندارد و برای شبیه‌سازی این اختلاط باید از طرح‌های حجم محدود مانند کوئیک استفاده شود.

- در ترازهای غوطه‌وری ($h^* \leq 1$)، روش شبیه‌سازی سطح آزاد VOF با طرح بازسازی هندسی میدان متوسط جریان در اطراف عرشه و متوسط ضریب نیروی درگ وارد شده بر آن را با دقت بهتری نسبت به روش سطح صلب شبیه‌سازی کرده، اما در ترازهای غوطه‌وری ($h^* > 1$)، دقت هر دو روش مناسب است.

در این شکل برای شبیه‌سازی از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG استفاده شده که بر طبق جدول ۲ بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی دارد.

همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، در تراز غوطه‌وری برابر $0/8$ ، در وجه قائم پایین‌دست عرشه یک گردابه وجود دارد. با افزایش تراز غوطه‌وری ۱، طول این گردابه افزایش یافته و یک گردابه کوچک نیز در وجه قائم پایین‌دست شکل می‌گیرد. در تراز غوطه‌وری برابر $1/2$ ، دو گردابه نامتقارن در وجه قائم پایین‌دست تشکیل شده که با افزایش تراز غوطه‌وری، طول گردابه‌های مزبور کاهش یافته و همچنین شکل آنها به وضعیت تقارن نزدیک می‌شود، به‌طوری‌که در ترازهای غوطه‌وری بالا این دو گردابه تقریباً متقارن بوده و طول آنها ثابت می‌ماند. وضعیت گردابه‌های وجه قائم پایین‌دست تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر ضریب نیروی درگ متوسط وارد شده بر عرشه دارد. به‌طوری‌که با افزایش تراز غوطه‌وری از $0/8$ به ۱ طول گردابه وجه قائم پایین‌دست افزایش یافته و در نتیجه ضریب نیروی درگ نیز افزایش می‌یابد (جدول ۲). در تراز غوطه‌وری برابر $1/2$ در وجه قائم پایین‌دست دو گردابه نامتقارن تشکیل شده که طول کمتری نسبت به گردابه غالب وجه قائم پایین‌دست برای تراز غوطه‌وری ۱ دارند، اما با توجه به آنکه در تراز غوطه‌وری برابر $1/2$ دو گردابه بزرگ در وجه قائم پایین‌دست به‌وجود آمده بنابراین ضریب نیروی درگ نسبت به تراز غوطه‌وری $1/0$ افزایش یافته است (جدول ۲).

به تدریج با افزایش تراز غوطه‌وری به بیشتر از مقدار $1/2$ طول گردابه‌های فوق کاهش یافته (شکل ۹) و سپس ضریب نیروی درگ نیز کاهش می‌یابد (جدول ۲). در ترازهای غوطه‌وری بالا، طول گردابه‌های فوق تغییر چندانی نداشته و ضریب نیروی درگ نیز تقریباً ثابت

F_D	متوسط نیروی درگ در واحد عرض مقطع
u_i	مؤلفه سرعت در جهت x_i
C_D	ضریب نیروی درگ
u_j	مؤلفه سرعت در جهت x_j
g	شتاب گرانش
$\overline{\rho u'_i u'_j}$	تنشهای رینولدز
Fr_s	عدد فرود عرشه
α	جزء حجم آب در سلول محاسباتی
h_b	ارتفاع مقطع از کف کانال
u	مؤلفه سرعت در جهت x
s	ضخامت مقطع
v	مؤلفه سرعت در جهت y
h	عمق آب در فاصله ۶۰ سانتی‌متری از بالادست مقطع

۱۰- منابع

حمزئی، م. جوان، م. اقبال زاده، ا. ۱۳۸۹. "شبیه‌سازی عددی جریان اطراف عرشه پل‌های مستغرق"، مجموعه مقالات نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ۱۸ الی ۲۰ آبان.

Blevins, R. D. (1984). Applied fluid dynamics handbook. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 309-347.

Denson, K.H. (1982). "Steady-state drag, lift and rolling-moment coefficients for inundated inland bridges." Rep. MSHD-RD-82-077, National Technical Information Service, Springfield, VA.

Federal Highway Administration (FHWA). (2009). "Hydrodynamic Forces on Inundated Bridge Decks." Rep. No. FHWA-HRT-09-028.

Hemon, P. and Santi, F. (2002). "On the aeroelastic behavior of rectangular cylinder in cross-flow." J. Fluids and Structures., 16, 855-889.

Hourigan, K. and Thompson, M.C. and Tan, B.T. (2001). "Self-sustained oscillation in flows around long blunt plates." J. Fluids and Structures., 15, pp. 387-398.

- در ترازهای غوطه‌وری $h^* \leq 1.2$ ، با افزایش تراز غوطه‌وری، ضریب نیروی درگ افزایش یافته و در تراز غوطه‌وری ۱/۲، به حداکثر می‌رسد و سپس با افزایش تراز غوطه‌وری، ضریب نیروی درگ کاهش می‌یابد. در ترازهای غوطه‌وری بالا با افزایش تراز غوطه‌وری، ضریب نیروی درگ تغییر ناچیزی داشته و در حال نزدیک شدن به مقدار ثابت آن در شرایط جریان نامحدود است.

- در ترازهای غوطه‌وری ($h^* \leq 1$) مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد، میدان جریان و ضریب نیروی درگ را با دقت بهتری نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی شبیه‌سازی کرده است. در ترازهای غوطه‌وری ($1 < h^* \leq 2.5$) (به استثنای تراز غوطه‌وری برابر ۲) مدل آشفتگی RNG $k-\varepsilon$ دقت بهتری داشته و در تراز غوطه‌وری برابر ۲، مدل $k-\varepsilon$ استاندارد تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. در ترازهای غوطه‌وری ۴ و ۵ نیز مدل آشفتگی Realizable $k-\varepsilon$ میدان جریان و ضریب نیروی درگ را اندکی دقیق‌تر از مدل آشفتگی RNG $k-\varepsilon$ شبیه‌سازی کرده است، اما دقت مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد به‌طور قابل ملاحظه‌ای پایین‌تر از دو مدل آشفتگی فوق است.

- با افزایش تراز غوطه‌وری و نزدیک شدن به شرایط جریان نامحدود، میدان متوسط جریان در اطراف عرشه به وضعیت تقارن نزدیک‌تر می‌شود.

۹- فهرست علائم

ρ	چگالی
h^*	تراز بی‌بعد غوطه‌وری
p	فشار
U_0	متوسط سرعت جریان ورودی
μ	لزجت دینامیکی

- Naudascher, E. (1991). AIRH Design Manual: Hydrodynamic Forces. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam.
- Naudascher, E. and Medlarz, H. (1983). "Hydrodynamic loading and backwater effect of partially submerged bridges." J. Hydraulic Research., 21(3), pp. 213-232.
- Naudascher, E. and Rockwell, D. (1993). AIRH Design Manual: Flow Induced Vibrations-An Engineering Guide. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam.
- Picek, T. and Havlik, A. and Mattas D. (2004). "Pressure flow and overflow bridges." J. Hydrology and Hydromechanics., 52, 185-192.
- Rockwell, D. (1998). "Vortex-body interactions." Annual Review of Fluid Mechanics., 30, pp. 199-229.
- Shimada, K. and Ishihara, T. (2002). "Application of modified $k-\varepsilon$ model to the prediction of aerodynamic characteristics of rectangular cross section cylinders." J. Fluids and Structures., 16, pp. 465-485.
- Simiu, E. and Scanlan, R.H. (1996). Wind Effects on Structures. Wiley, New York.
- Tainsh, J. (1965). "Investigation of forces on submerged bridge beams." Rep. No. 108, Dept. of Public Works, Univ. of New South Wales, Sydney, Australia.
- Yu, D. and Kareem, A. (1998). "Parametric study of flow around rectangular prisms using LES." J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics., 77-78, pp. 653-662.
- Liaw, K.F., (2005). "Simulation of flow around bluff bodies and bridge deck sections using CFD." PhD thesis, Univ. of Nottingham.
- Malavasi, S. and Franzetti, S. and Blois G. (2004). "PIV investigation of flow around submerged river bridge." Proc. of the 2th World Conf. on River Flow, Napoli, pp. 601-608.
- Malavasi, S. and Guadagnini, A. (2007). "Interactions between a rectangular cylinder and a free-surface flow." J. Fluids and Structures., 23, pp. 1137-1148.
- Malavasi, S. and Guadagnini, A. (2005). "Hydrodynamic loading on river bridges." J. Hydraulic Eng., 131, pp. 622-623.
- Malavasi, S. and Guadagnini, A. (2003). "Hydrodynamic load on river bridge." J. Hydraulic Eng., 129, pp. 854-861.
- Malavasi, S. and Negri, M. (2008). "Analysis of the non-stationary flow around a rectangular cylinder." Proc. BBAA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, Milano, Italy, July, 20-24.
- Malavasi, S. and Trabucchi, N. (2008). "Numerical investigation of the flow around a rectangular cylinder near a solid wall." Proc. BBAA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, Milano, Italy, July, 20-24.
- Nakamura, Y. and Ohya, Y. and Tsuruta, H. (1991). "Experiments on vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges." J. Fluid Mechanics., 222, pp. 437-447.