

## بررسی اندرکنش میدان متوسط جریان اطراف عرشه پل مستغرق با بستر کانال و سطح آزاد

مصطفی حمزئی<sup>۱</sup>، میترا جوان<sup>۲</sup>، افشین اقبال زاده<sup>۳</sup> و سید عطا امینی<sup>۴</sup>

### چکیده

در حین یک رخداد بحرانی در رودخانه‌ها مانند سیل، عرشه پل ممکن است در جریان آب رودخانه غرق شود. استغراق عرشه یک وضعیت بحرانی برای پایداری سازه‌ای پل‌های رودخانه‌ها محسوب می‌شود. در مقاله حاضر، میدان متوسط جریان در اطراف عرشه پل و ضریب نیروی درگ متوسط زمانی وارد بر آن با استفاده از نرم افزار *flownet* و بهره‌گیری از سه نوع مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد،  $k-\epsilon$  RNG و  $k-\epsilon$  Realizable شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی‌ها اثر تغییر فاصله عرشه از بستر کانال و سطح آزاد آب بر میدان متوسط جریان مجاور عرشه و ضریب نیروی درگ متوسط زمانی وارد بر آن، در شرایطی که عمق آب در بالادست عرشه ثابت باشد، بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که برای فاصله عرشه از بستر معادل ۰/۵ برابر ضخامت عرشه که عرشه در نزدیکی بستر کانال واقع شده، مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG و  $k-\epsilon$  Realizable تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارند. در سایر فواصل عرشه از کف، مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد دارای دقت مناسب‌تری می‌باشد. در شرایطی که فاصله عرشه از بستر کانال و سطح آزاد زیاد است، میدان متوسط جریان اطراف عرشه متقارن و ضریب نیروی درگ با تغییر این فاصله، نسبتاً ثابت است. اما با نزدیک شدن عرشه به بستر کانال و یا سطح آزاد، وضعیت تقارن میدان جریان از بین رفته و با تغییر این فاصله ضریب نیروی درگ تغییر می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی عددی، مدل آشفتگی، فلونت، نیروی درگ و عرشه پل.

**ارجاع:** حمزئی م. جوان م. اقبال‌زاده ا. و امینی س.ع. ۱۳۹۰. بررسی اندرکنش میدان متوسط جریان اطراف عرشه پل مستغرق با بستر کانال و سطح آزاد. مجله پژوهش آب ایران.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب، دانشگاه رازی کرمانشاه.

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

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

۴- دکترای مهندسی عمران- منابع آب، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کردستان.

\* نویسنده مسئول: [eghbalzadeh@gmail.com](mailto:eghbalzadeh@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۰/۱۳

## مقدمه

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 نسبتاً فراوان رخ می‌دهد. در هنگام تراز کم سطح آب روی سازه مستغرق، ضرایب نیروی متوسط بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مقادیر متناظر آنها در جریان نامحدود است (مالاوسی و همکاران، ۲۰۰۴).

استفاده از مدل‌های عددی در شبیه‌سازی جریان سبب کاهش هزینه‌های زیاد مدل‌های آزمایشگاهی می‌شود. یو و کریم (۱۹۹۸) برای بررسی تغییرات پدیده جدایی جریان در اثر افزایش نسبت طول به عرض سیلندر، میدان جریان اطراف یک سیلندر مستطیلی با نسبت طول به عرض بین ۱ و ۴ را با بهره‌گیری از مدل آشفتگی گردابه‌های بزرگ<sup>۱</sup> به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. شیمادا و ایشیارا (۲۰۰۲) شبیه‌سازی ساختار غیردائمی گردابه‌ها در ناحیه انتهایی یک سیلندر مستطیلی را با نسبت‌های طول به عرض متفاوت، با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  اصلاح شده انجام دادند. لیاو (۲۰۰۵) میدان جریان نامحدود اطراف یک سیلندر مستطیلی را با بهره‌گیری از روش‌های مدل‌سازی LES و مستقیم عددی<sup>۲</sup> شبیه‌سازی کرد.

در مقاله حاضر، میدان متوسط جریان آشفته در اطراف عرشه پل و همچنین ضریب نیروی درگ متوسط وارد بر آن با استفاده از نرم‌افزار *flownet* و مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد،  $k-\epsilon$  RNG و  $k-\epsilon$  Realizable شبیه‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی‌ها اثر فاصله عرشه از کف کانال و سطح آزاد آب بر میدان متوسط جریان و ضریب نیروی درگ متوسط زمانی وارد بر آن، در شرایطی که عمق آب در بالادست عرشه ثابت باشد، بررسی شده است.

## مواد و روش‌ها

### معادلات حاکم بر جریان

قوانین حاکم بر جریان عبارتند از قانون بقای جرم و بقای مومنتم که در حالت جریان آشفته و به صورت

استغراق عرشه پل‌های رودخانه‌ها در حین وقوع سیل ممکن است پایداری سازه را سخت به مخاطره اندازد. تعدادی از محققین با شبیه‌سازی آزمایشگاهی و عددی عرشه پل‌های رودخانه‌ای مستغرق را بررسی کرده‌اند. اندرکنش یک سیال جاری و یک سیلندر مستطیلی با مدل‌سازی آزمایشگاهی توسط ناوداسچر (۱۹۹۱)، ناکامورا و همکاران (۱۹۹۱)، ناوداسچر و راکول (۱۹۹۳)، سیمی و اسکنلان (۱۹۹۶)، راکول (۱۹۹۸) و هوریگن و همکاران (۲۰۰۱) مورد تحقیق و مطالعه قرار گرفته است. با وجود تحقیقات فوق هنوز موضوعاتی مانند تجزیه و تحلیل تأثیر شرایط مرزی نامتقارن بر روی بارگذاری هیدرودینامیکی سازه‌های پل‌ها، جای مطالعه و بررسی فراوان دارد (هیمون و سانتی، ۲۰۰۲ و شیمادا و ایشیارا، ۲۰۰۲). استغراق عرشه پل‌های رودخانه‌ها یکی از موارد اثر شرایط مرزی نامتقارن بر روی سازه پل است. به عبارت دیگر با قرار گرفتن یک سازه در معرض یک جریان با سطح آزاد، بارهای دینامیکی وارد بر سازه تحت تأثیر وضعیت مرزی نامتقارن خواهد بود. علی‌رغم جدی بودن مشکل استغراق عرشه پل‌های رودخانه‌ها، تحقیقات آزمایشگاهی اندکی پیرامون این موضوع موجود است. تینش (۱۹۶۵) و دنسون (۱۹۸۲) جریان دارای 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 یک سیلندر مستطیلی در نظر گرفته شده است (مالاوسی و گوادگنینی، ۲۰۰۳؛ مالاوسی و همکاران، ۲۰۰۴ و پایسک و همکاران، ۲۰۰۲). مالاوسی و گوادگنینی (۲۰۰۳، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷) با انجام مطالعات آزمایشگاهی اثر تراز غوطه‌وری و عدد فرود عرشه را بر ضرایب نیروی متوسط وارد بر عرشه پل، بررسی کرده است. با توجه به نتایج آنها مشخص گردید که مقادیر ضرایب نیروی متوسط زمانی آزمایشگاهی بدست آمده برای یک سیلندر مستطیلی که در یک جریان نامحدود واقع شده، دارای تفاوت زیادی نسبت به هنگام واقع شدن آن در یک جریان با سطح آزاد است. محققین

1- Large Eddy Simulatin (LES)

2 - Direct Numerical Simulation (DNS)

همانطور که اشاره شد برای حل معادلات از نرم افزار شبیه سازی جریان flownet استفاده شده است. این نرم افزار کل میدان جریان را به صورت حجم کنترل های مجزا در نظر می گیرد. از معادلات حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال گرفته و با استفاده از طرح های مختلف انفصال، معادلات جبری منفصل می شوند. برای تهیه هندسه میدان جریان و شبکه بندی آن از نرم افزار پیش پردازنده گمبیت استفاده شده است. از طرح پرست<sup>۱</sup> برای گسسته سازی فشار، طرح کوئیک برای انفصال جملات جابجایی معادلات مومنتم، طرح آپ ویند مرتبه اول برای انفصال جملات جابجایی معادلات آشفتگی و همچنین از الگوریتم پیزو برای کوپل نمودن سرعت و فشار استفاده گردیده است همچنین برای جلوگیری از واگرایی حل، ضرایب زیر تخفیف کوچکتر از یک برای فشار، مومنتم، انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ استهلاك انرژی جنبشی آشفتگی (ε) مورد استفاده قرار گرفته اند.

#### مشخصات میدان حل و شبکه بندی آن

در این مقاله برای صحت سنجی مدل عددی از آزمایش های انجام شده توسط مالاوسی و گوادگینی (۲۰۰۷) و مالاوسی و نگری (۲۰۰۸) بهره گرفته شده است. در مدلسازی آزمایشگاهی از یک کانال روباز مستطیلی از جنس پلکسی گلاس با عرض ۰/۵ متر، طول ۵ متر و ارتفاع ۰/۶ متر استفاده شده است. همچنین از یک سیلندر مستطیلی با گوشه های تیز برای مدل نمودن عرشه پل استفاده شده که این سیلندر به دیواره های جانبی کانال متصل شده و در فاصله ۳/۳۵ متری از مقطع ورودی و فواصل مختلف از کف قرار گرفته است. طول سیلندر (I) ۰/۱۸ متر، ضخامت آن (S) ۰/۰۶ متر و نسبت طول به ضخامت (I/S) ۳ می باشد (شکل ۱). ضمناً در تحقیق حاضر از نتایج آزمایشگاهی مربوط به عدد رینولدز (Re) برابر  $1.21 \times 10^4$  استفاده شده است. عدد رینولدز (Re) به صورت زیر تعریف می شود:

$$Re = U_0 s / \nu \quad (3)$$

متوسط گیری شده در زمان، معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده رینولدز به شکل زیر از آنها استخراج می شود.

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

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

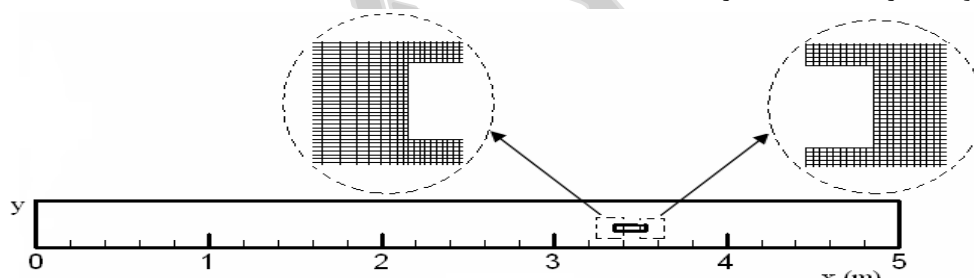
$$\frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial(-\rho u'_i u'_j)}{\partial x_j}$$

که در آنها،  $u_i$  مؤلفه سرعت در جهت  $x_i$ ،  $u_j$  مؤلفه سرعت در جهت  $x_j$  ( $i, j = 1, 2$ ) به ترتیب برای جهت های  $x$  و  $y$ ، فشار،  $p$ ، چگالی،  $\rho$  ویسکوزیته دینامیکی و جمله  $\rho u'_i u'_j$  به عنوان تنش های رینولدز شناخته می شوند. این معادلات دارای سه مجهول شامل مؤلفه های سرعت در دو جهت ( $u, v$ ) و فشار می باشند.

از طرفی معادله مومنتم حاوی سه مؤلفه مجهول تنش رینولدز است، لذا سیستم معادلات فوق بسته نیست و بایستی با استفاده از مدل آشفتگی مناسب تنش های رینولدز محاسبه شوند. در این مقاله از مدل های آشفتگی دو معادله ای  $k-\epsilon$  استاندارد،  $k-\epsilon$  RNG و  $k-\epsilon$  Realizable استفاده شده است. در این مدل ها، یک معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی ( $k$ ) و یک معادله انتقال برای اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی ( $\epsilon$ ) حل می شود. تفاوت سه مدل آشفتگی فوق عمدتاً در معادله  $\epsilon$  است. مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد و در استخراج معادلات  $k$  و  $\epsilon$  آن چنین فرض شده است که جریان کاملاً متلاطم بوده و اثر لزجت مولکولی بسیار ناچیز باشد. در مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG یک جمله اضافی در معادله  $\epsilon$  وارد می شود که باعث افزایش دقت محاسباتی مدل در جریان های کرنشی می گردد. مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  Realizable نیز دارای دو تفاوت عمده با مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد است، از جمله تعیین رابطه جدید جهت محاسبه لزجت گردابه ای و اضافه شدن یک جمله چشمه به معادله  $\epsilon$  که تغییرات چرخش جریان در آن لحاظ شود.

#### حل عددی معادلات

به طرف بالادست با ضریب  $1/2$  افزایش یافته است، اما به دلیل وجود جریان‌های گردابه‌ای در پایین‌دست سیلندر، شبکه‌بندی تا فاصله  $20$  سانتیمتر به طرف پایین‌دست سیلندر یکنواخت و پس از آن با ضریب  $1/2$  به طرف پایین دست افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که جهت انتخاب ضریب افزایش شبکه به سمت بالادست و پایین‌دست، پروفیل سرعت در مقطعی در بالادست و پایین‌دست سیلندر در دو حالت با ضریب افزایش شبکه  $1/5$  و  $1/2$  با یکدیگر مقایسه شد که در نهایت به دلیل تطابق پروفیل‌های سرعت در دو حالت فوق، جهت کاهش زمان اجرای مدل عددی ضریب  $1/2$  به عنوان ضریب افزایش شبکه انتخاب شد. شکل ۲ میدان حل جریان و نحوه شبکه‌بندی میدان در بالادست و پایین‌دست سیلندر مستطیلی را در شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده نشان می‌دهد.



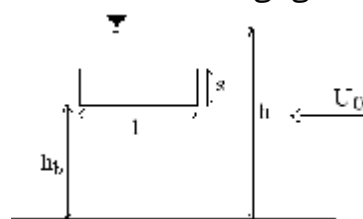
شکل ۲- میدان حل جریان و نحوه شبکه بندی میدان در بالادست و پایین دست سیلندر مستطیلی

شده است. در مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد، RNG  $k-\epsilon$  و Realizable  $k-\epsilon$ . برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در نزدیکی مرزهای جامد از تابع استاندارد دیواره استفاده شد. این تابع مانند یک پل، پاسخ‌های نقاط داخلی میدان را به نواحی نزدیک دیوار مرتبط می‌سازد و بدین ترتیب از استفاده از شبکه ریز در نواحی (نزدیک دیواره) با گرادیان شدید پرهیز می‌شود.

### نتایج و بحث

در این بخش ابتدا توانایی مدل‌های آشفتگی مختلف در شبیه‌سازی میدان جریان اطراف عرشه، بررسی و مطالعه

که در آن،  $U_0$  سرعت متوسط جریان ورودی و  $V$  لزجت سینماتیکی می‌باشد.



شکل ۱- مقطع طولی کانال و وضعیت قرارگیری سیلندر (پلان) در مدلسازی آزمایشگاهی و عددی

در مقاله حاضر، با توجه به مستقیم بودن کانال آزمایشگاهی و عدم تغییر هندسه در عرض کانال و عرض سیلندر مستطیلی واقع شده در آن، شبیه‌سازی عددی به صورت دو بعدی در قائم انجام شده است. شبکه‌بندی میدان حل در اطراف سیلندر مستطیلی در عمق و در طول به صورت یکنواخت است. با توجه به وجود جریان یکنواخت در بالادست سیلندر، شبکه بندی

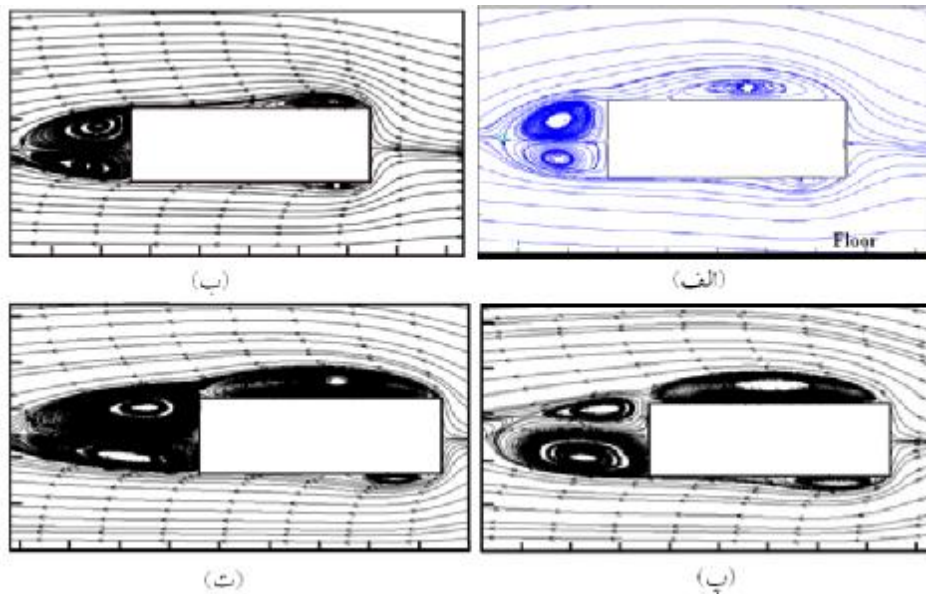
### شرایط مرزی

با توجه به آنکه برای صحت سنجی مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی مالوسی و گوادگینی (۲۰۰۷) و مالوسی و نگری (۲۰۰۸) استفاده شده، لازم است که شرایط مرزی در مدل عددی منطبق بر آزمایش‌های انجام شده باشند.

در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، در مرز ورودی از مقادیر معلوم برای پارامترهای مختلف استفاده شده است. در کف کانال و جداره‌های سیلندر، شرط مرزی دیواره بکار رفته است. در مرز فوقانی بدلیل تغییرات ناچیز سطح آزاد، شرط مرزی تقارن و همچنین در خروجی کانال از شرط مرزی جریان خروجی<sup>۱</sup> استفاده

۳۶ سانتیمتر را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مالاوسی و نگری (۲۰۰۸) نشان می‌دهد.

شده است. شکل ۳ میدان متوسط جریان شبیه‌سازی شده با مدل‌های آشفتگی مختلف در اطراف عرشه با فاصله از کف ۶ سانتیمتر ( $h_b/s=1$ ) و عمق بالادست



شکل ۳- میدان متوسط جریان اطراف عرشه در  $h_b/s=1$  و  $h/s=6$  (الف) آزمایشگاهی (ب)  $k-\epsilon$  استاندارد (پ)  $k-\epsilon$  Realizable (ت) RNG  $k-\epsilon$

ضریب نیروی درگ ( $C_D$ ) با استفاده از معادله ۴ محاسبه می‌شود:

$$C_D = F_D / (0.5 \rho U_0^2 s) \quad (4)$$

در این معادله،  $F_D$  نیروی درگ متوسط در واحد عرض سیلندر و  $\rho$  چگالی سیال است. طبق نتایج آزمایشگاهی در این حالت مقدار ضریب نیروی درگ معادل ۱/۶۹ است. مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG و Realizable  $k-\epsilon$  مقدار ضریب نیروی درگ را ۱/۶۲ پیش‌بینی نموده‌اند در حالی که مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد مقدار ضریب نیروی درگ را ۱/۷ پیش‌بینی کرده است.

در ادامه، توانایی مدل‌های آشفتگی مختلف  $k-\epsilon$  استاندارد،  $k-\epsilon$  Realizable و  $k-\epsilon$  RNG در شبیه‌سازی ضریب نیروی درگ ( $C_D$ ) وارد بر سیلندر مستطیلی، برای فواصل مختلف عرشه از کف کانال و سطح آب در شرایطی که عمق آب در بالادست عرشه ثابت باشد، بررسی و مطالعه شده است. در شکل

همانطور که در این شکل دیده می‌شود، مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد مختصات مرکز و انتهای گردابه وجه افقی تحتانی و همچنین مختصات مرکز و انتهای گردابه‌های وجه قائم پایین‌دست را نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی بسیار مناسب‌تر پیش‌بینی نموده است. در ضمن همه مدل‌های آشفتگی محل نقطه سکون<sup>۱</sup> واقع بر وجه قائم بالادست را با دقت تقریباً یکسانی پیش‌بینی کرده‌اند.

اما مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG و Realizable تنها مختصات مرکز گردابه وجه افقی فوقانی را نسبت به مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد مناسب‌تر پیش‌بینی کرده‌اند. در مجموع مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد میدان متوسط جریان را مناسب‌تر شبیه‌سازی کرده و این مسأله منجر به پیش‌بینی بهتر ضریب نیروی درگ توسط این مدل آشفتگی شده است.

1 - Stagnation point

تشکیل نشده است، اما در این حالت ابعاد گردابه وجه افقی فوقانی عرشه زیاد است. به تدریج با افزایش فاصله عرشه از بستر کانال، گردابه‌ای بر روی وجه افقی تحتانی تشکیل می‌شود و با بیشتر شدن فاصله از بستر ابعاد آن گسترش می‌یابد. اما افزایش فاصله از بستر کانال موجب کاهش ابعاد گردابه وجه افقی فوقانی می‌شود و به تدریج ابعاد گردابه‌های وجوه افقی فوقانی و تحتانی با یکدیگر برابر می‌شوند و میدان متوسط جریان در مجاورت این دو وجه به وضعیت تقارن نزدیک می‌شود. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در  $h_b/s$  معادل ۲/۳۳ و ۳/۵ میدان جریان تقریباً متقارن است. با بیشتر شدن فاصله از بستر در شرایطی که عرشه در نزدیکی سطح آزاد قرار می‌گیرد، میدان متوسط جریان تحت تأثیر شرط مرزی سطح آزاد قرار می‌گیرد و تقارن میدان جریان از بین می‌رود. به طوری که با نزدیک شدن عرشه به سطح آزاد، ابعاد گردابه وجه افقی فوقانی کاهش و ابعاد گردابه وجه افقی تحتانی افزایش می‌یابد. در  $h_b/s$  معادل ۵/۵، گردابه وجه افقی فوقانی از بین رفته در صورتی که ابعاد گردابه وجه افقی تحتانی قابل توجه است.

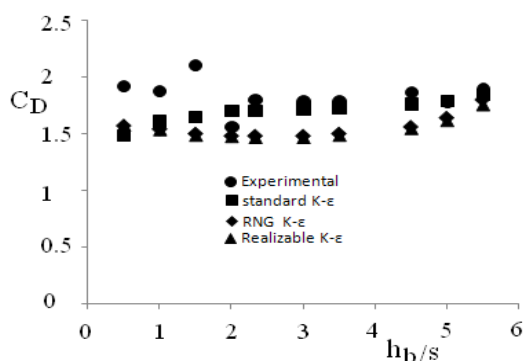
لازم به ذکر است نیروی درگ از دو بخش تشکیل می‌شود، بخشی از آن ناشی از اختلاف فشار (درگ فشاری یا شکلی) و بخشی دیگر ناشی از تنش‌های برشی (درگ اصطکاکی یا لزجی) است. در تحقیق حاضر نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که بیشترین سهم ضریب نیروی درگ اصطکاکی مربوط به  $h_b/s$  معادل ۵/۵ و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد است که سهم ضریب نیروی درگ اصطکاکی ۰/۳۸ درصد ضریب نیروی درگ است. در این حالت مقدار ضریب نیروی درگ فشاری ۱/۸۳۸ و مقدار ضریب نیروی درگ اصطکاکی ۰/۰۰۷ است. بنابراین سهم درگ اصطکاکی بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است که علت آن می‌تواند سرعت پایین جریان در مجاورت وجوه افقی به دلیل تشکیل گردابه بر روی آنها و عدم زبری باشد. لذا نیروی درگ وارد بر عرشه عمدتاً ناشی از اختلاف فشار در وجوه قائم بالادست و پایین‌دست آن است. بنابراین

۴ ضرایب نیروی درگ متوسط زمانی شبیه‌سازی شده با مدل‌های آشفتگی مختلف و مقادیر متناظر آزمایشگاهی مالاوسی و گوادگینی (۲۰۰۷) برای فواصل مختلف عرشه از کف و با عمق بالادست ثابت معادل ۴۲ سانتیمتر ارائه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG و  $k-\epsilon$  Realizable ضریب نیروی درگ وارد بر عرشه را با دقتی نزدیک به هم شبیه‌سازی نموده‌اند در حالی که دقت نتایج مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد بطور قابل ملاحظه‌ای با مدل‌های آشفتگی فوق تفاوت دارد. در حالت  $h_b/s$  برابر با ۰/۵، مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG و  $k-\epsilon$  Realizable مقدار ضریب نیروی درگ وارد بر عرشه را اندکی مناسب‌تر شبیه‌سازی نموده‌اند. اما در سایر حالات بغیر از حالت  $h_b/s$  برابر با ۲، مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد دارای دقت بیشتری است. همچنین با توجه به شکل ۴ می‌توان گفت که در  $2 < h_b/s < 4.5$ ، تأثیر شرایط مرزی کف کانال و سطح آزاد بر مقدار ضریب نیروی درگ ناچیز بوده و در این ناحیه مقدار ضریب نیروی درگ نسبتاً ثابت است. در  $h_b/s \geq 4.5$  و به خصوص در  $h_b/s \leq 2$  به دلیل تأثیر شرایط مرزی فوق در مقدار ضریب نیروی درگ تغییراتی ایجاد می‌شود.

همانطور که در این شکل مشخص است در نتایج آزمایشگاهی در حالت  $h_b/s \geq 4.5$  و بخصوص در حالت  $h_b/s \leq 2$ ، تغییر در مقدار ضریب نیروی درگ بصورت نوسانی اتفاق افتاده است. هیچ کدام از مدل‌های آشفتگی فوق، علی‌رغم اینکه در این نواحی تغییر در مقدار ضریب نیروی درگ را شبیه‌سازی کرده‌اند، نمی‌توانند این روند نوسانی را شبیه‌سازی کنند.

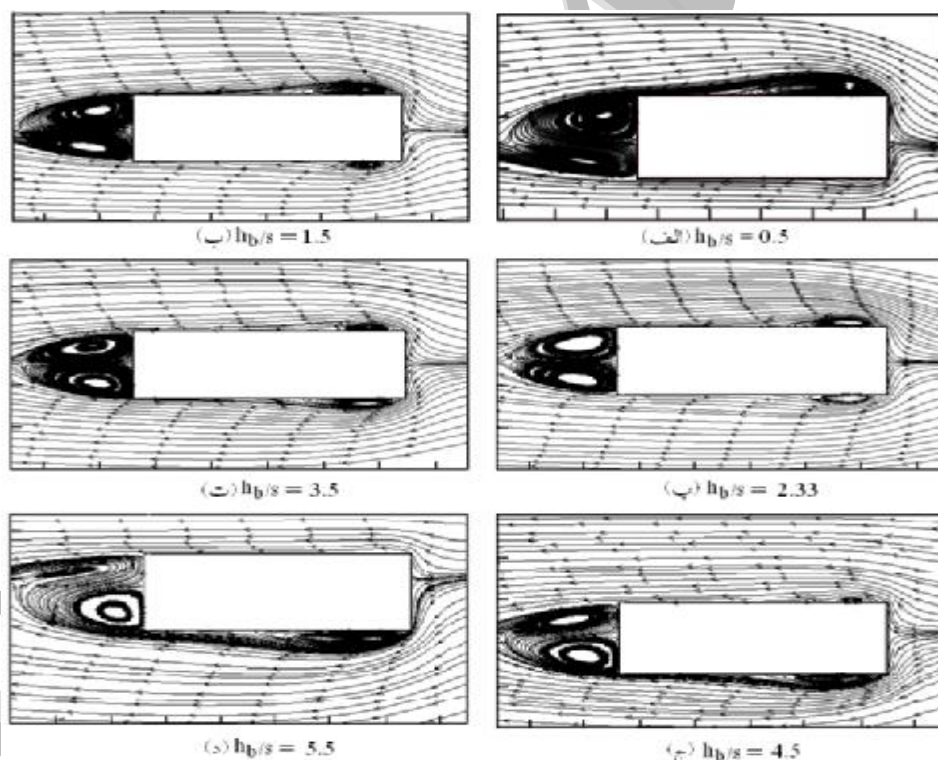
در شکل ۵ تأثیر شرایط مرزی کف کانال و سطح آزاد بر میدان متوسط جریان اطراف عرشه نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این شکل جهت شبیه‌سازی از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، هنگامی که فاصله عرشه از کف ناچیز است ( $h_b/s = 0.5$ ) گردابه‌ای بر روی وجه افقی تحتانی

هنگامی که عرشه به بستر کانال و یا سطح آزاد نزدیک می‌شود، دو گردابه فوق نامتقارن می‌شود و ابعاد آنها در حال تغییر است لذا در این شرایط تغییرات ضریب نیروی درگ نیز زیاد است (شکل ۴).



شکل ۴- مقایسه ضریب نیروی درگ شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی در  $h/s = 7$

وضعیت گردابه‌های وجوه افقی فوقانی و تحتانی تأثیر چندانی بر ضریب نیروی درگ شبیه‌سازی شده نخواهد داشت زیرا نیروی درگ وارد بر وجوه افقی فوقانی و تحتانی از نوع اصطکاکی است. اما وجود گردابه‌های وجه قائم پایین دست باعث ایجاد اختلاف فشار دینامیکی بین وجه قائم بالادست و پایین دست عرشه شده و لذا ابعاد این گردابه‌ها تأثیر زیادی بر ضریب نیروی درگ شبیه‌سازی شده خواهد داشت. همانطور که در شکل ۵ و سطح آزاد زیاد است ( $h_b/s$  معادل  $2/33$  و  $3/5$ )، بر روی وجه قائم پایین دست عرشه دو گردابه متقارن تشکیل می‌شود که ابعاد آنها تقریباً ثابت است، لذا در این شرایط تغییرات ضریب نیروی درگ نیز ناچیز است.



شکل ۵- میدان متوسط جریان شبیه‌سازی شده اطراف عرشه در فواصل مختلف از بستر کانال و  $h/s = 7$

سازه‌های آن محسوب می‌شود. در تحقیق حاضر، میدان متوسط جریان در اطراف عرشه پل و ضریب نیروی درگ متوسط زمانی وارد بر آن با استفاده از نرم‌افزار flownet و بهره‌گیری از سه نوع مدل آشفتگی

### نتیجه گیری

در حین رخدادهای بحرانی در رودخانه‌ها مانند سیل، عرشه پل ممکن است در جریان رودخانه مستغرق شود. استغراق عرشه پل یک وضعیت بحرانی برای پایداری

- 7- Malavasi S. and Guadagnini A. 2003. Hydrodynamic load on river bridge. Journal of Hydraulic Engineering 129: 854-861.
- 8- Malavasi S. and Guadagnini A. 2005. Hydrodynamic loading on river bridges. Journal of Hydraulic Engineering 131: 622-623.
- 9- Malavasi S. and Guadagnini A. 2007. Interactions between a rectangular cylinder and a free-surface flow. Journal of Fluids and Structures 23: 1137-1148.
- 10- 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.
- 11- Nakamura Y. Ohya Y. and Tsuruta H. 1991. Experiments on vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges. Journal of Fluid Mechanics 222: 437-447.
- 12- Naudascher E. 1991. AIRH Design Manual: Hydrodynamic forces. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam.
- 13- Naudascher E. and Medlarz H. 1983. Hydrodynamic loading and backwater effect of partially submerged bridges. Journal of Hydraulic Research 21(3): 213-232.
- 14- Naudascher E. and Rockwell D. 1993. AIRH Design Manual: Flow induced vibrations-An Engineering Guide. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam.
- 15- Picek, T. Havlik A. and Mattas D. 2004. Pressure flow and overflow bridges. Journal of Hydrology and Hydromechanics 52: 185-192.
- 16- Rockwell D. 1998. Vortex-body interactions. Annual Review of Fluid Mechanics. 30, 199-229.
- 17- Shimada K. and Ishihara T. 2002. Application of modified  $k-\varepsilon$  model to the prediction of aerodynamic characteristics of rectangular cross section cylinders. Journal of Fluids and Structures 16: 465-485.
- 18- Simiu E. and Scanlan R.H. 1996. Wind effects on structures. Wiley, New York.
- 19- Tainsh J. 1965. Investigation of forces on submerged bridge beams. Rep. No. 108, Dept of Public Works, Univ. of New South Wales, Sydney, Australia.
- 20- Yu D. and Kareem A. 1998. Parametric study of flow around rectangular prisms using LES. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 77&78: 653-662.

$k-\varepsilon$  استاندارد، و  $k-\varepsilon$  Realizable و  $k-\varepsilon$  RNG در این شبیه‌سازی‌ها اثر فاصله عرشه از کف کانال و سطح آزاد آب بر میدان متوسط جریان مجاور عرشه و ضریب نیروی درگ متوسط زمانی وارد بر آن با ثابت بودن عمق بالادست عرشه بررسی شده است. تطابق مناسب نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود، نشان دهنده توانایی شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی مناسب میدان متوسط جریان مجاور عرشه و نیروی درگ متوسط وارد بر آن می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج شبیه‌سازی عددی می‌توان گفت در حالت  $(h_b/s) = 0.5$ ، مدل‌های آشفتگی  $k-\varepsilon$  و  $k-\varepsilon$  Realizable مقدار ضریب نیروی درگ وارد بر عرشه را اندکی مناسب‌تر شبیه‌سازی نموده‌اند. اما در سایر حالات بغیر از حالت  $(h_b/s) = 2$ ، مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد دقیق‌تر است و در شرایطی که فاصله عرشه از بستر کانال و سطح آزاد زیاد است، میدان متوسط جریان اطراف عرشه متقارن و ضریب نیروی درگ با تغییر این فاصله، نسبتاً ثابت است. اما با نزدیک شدن عرشه به بستر کانال و یا سطح آزاد، وضعیت تقارن میدان جریان از بین رفته و با تغییر این فاصله ضریب نیروی درگ تغییر می‌کند.

#### منابع

- 1- 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.
- 2- Hemon P. and Santi F. 2002. On the aeroelastic behavior of rectangular cylinder in cross-flow. Journal of Fluids and Structures 16: 855-889.
- 3- Hourigan K. Thompson M.C. and Tan B.T. 2001. Self-sustained oscillation in flows around long blunt plates Journal of Fluids and Structures 15: 387-398.
- 4- Liaw K.F. 2005. Simulation of flow around bluff bodies and bridge deck sections using CFD. PhD thesis. Univ. of Nottingham.
- 5- Malavasi S. Franzetti S. and Blois G. 2004.
- 6- PIV investigation of flow around submerged river bridge. proc. of the 2<sup>th</sup> Word Conf. on River Flow, Napoli : 601-608.