

ارزیابی نتایج تجربی و عددی فرسایش بستر پیرامون پایه‌های پل با مقاطع هندسی مختلف

نازیلا کاردان^{۱*}، نسرین حسن پور^۲ و علی حسین زاده دلیر^۳

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران
۲ و ۳- به ترتیب: دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، و استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۷/۲۶

چکیده

در تحقیق حاضر به مطالعه تجربی و عددی تأثیر مقاطع هندسی مختلف پایه پل بر کاهش فرسایش بستر و تنش برشی بستر پرداخته شده است. در مطالعه تجربی فرسایش بستر پیرامون مدل‌های پایه پل بررسی و میزان درصد کاهش در هر مدل برآورد شده است. در مطالعه عددی، میدان جریان اطراف مدل پایه‌ها به صورت سه بعدی با نرم افزار فلوننت شبیه سازی و اثر هر یک از مقاطع بر کاهش تنش بر شیب بستر بررسی شده است. برای تعیین درصد کارایی هر یک از مقاطع، پایه استوانه‌ای به عنوان مدل مبنا انتخاب و میزان کاهش تنش برشی بستر در مدل عددی برای هر یک از مقاطع با کاهش عمق آبشستگی در مدل‌های فیزیکی مقایسه شده است. با توجه به حساسیت مدل‌های عددی به مدل‌های آشفستگی، مدل‌های آشفستگی $k - \varepsilon$ با مقایسه نیمرخ‌های سرعت و سطح آزاد آب صحت‌سنجی شدند. نتایج بررسی‌ها نشان داد مدل RNG از زیرمجموعه این مدل آشفستگی به حصول نتایج عددی با دقت قابل قبولی منجر شده است. از میان مقاطع هندسی مختلف که برای پایه پل در نظر گرفته شده است، مقطع دوکی شکل با ابتدای تیز، با کاهش ۷۲ درصد عمق آبشستگی، نسبت به مدل مبنا، بهترین مدل تعیین شده است. مدل ترکیبی مقطع مستطیلی با مثلث انتهایی با کاهش ۸ درصد در فرسایش بستر، کمترین تأثیر را بر بهبود نتایج داشته است. مقطع مستطیلی نیز موجب افزایش عمق آبشستگی به میزان ۷ درصد شده است. نظر به محدودیت‌های که در انجام مطالعات آزمایشگاهی وجود دارد، مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی یکی دیگر از اهداف پژوهش حاضر بوده است. نتایج به دست آمده همسو بودن کاهش تنش برشی را در مدل‌های عددی و کاهش عمق آبشستگی را در مدل‌های تجربی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

آبشستگی، پایه پل، تنش برشی، مدل آشفستگی، مدل عددی

مقدمه

عددی مختلفی در زمینه مدل‌سازی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون پایه‌های پل صورت گرفته است. لارسن و تاچ (Laursen & Toch, 1956)، شن و همکاران (Shen et al., 1969)، ملویل (Melville, 1975)، اتما (Ettema, 1980)، درگاهی (Dargahi, 1990)، بروسرز و رادکیوی (Breusers & Raudkivi, 1991) و گرمالدی و

همه ساله پل‌های زیادی در سراسر جهان به دلیل بی‌توجهی به معیارهای هیدرولیکی تخریب می‌شوند. اغلب مشکلاتی که بعد از ساخت پل‌ها به وجود می‌آیند ناشی از بی‌دقتی کامل به مواردی نظیر تخمین دقیق آبشستگی در اطراف پایه‌های پل است. از این‌رو مطالعات تجربی و

همکاران (Roulund *et al.*, 2005) جریان سه‌بعدی اطراف پایه را با استفاده از مدل عددی شبیه‌سازی و تأثیر ضخامت لایه مرزی، زبری بستر و شیب‌دار بودن پایه نسبت به خط قائم را بر شکل‌گیری گردابه‌های نعل اسبی ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که طول گردابه‌های نعل اسبی با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. بارانیا و همکاران (Baraniya *et al.*, 2012) یک مدل عددی سه‌بعدی برای حل معادلات ناویر استوکس با بهره‌گیری از مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ و الگوریتم شبکه آشیانه‌ای ارائه دادند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده برای سرعت جریان، انرژی سینماتیک آشفته و توزیع تنش برشی بستر، همپوشانی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارند.

آریان‌فر و همکاران (Ariyanfar *et al.*, 2008)، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، الگوی جریان در اطراف پایه پل ساده و شکاف‌دار را به صورت سه‌بعدی بررسی کردند. در این پژوهش مجموعه مدل‌های آشفتگی RSM و $k - \varepsilon$ مقایسه و نشان داده شد که دو مدل $RSM(Quadratic)$ و $RNG(k - \varepsilon)$ ، نسبت به سایر مدل‌ها، نتایج بهتری ارائه می‌دهند. کاردان و همکاران (Kardan *et al.*, 2015) طی مطالعات عددی تأثیر استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف را در شبیه‌سازی عددی الگوی جریان پیرامون پایه‌های استوانه‌ای بررسی کردند. در این بررسی با مقایسه نیمرخ سرعت جریان قبل از پایه، ناحیه دنباله جریان، زاویه جدایش جریان، نحوه انتشار گردابه‌ها، و توزیع تنش‌های برشی بحرانی پیرامون پایه، سه مدل آشفتگی ویسکوزیته گردابی، تنش رینولدز و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES) بررسی شده است. حسن‌زاده و همکاران (Hassanzadeh *et al.*, 2015) تأثیر مدل‌های ترکیبی مقطع هندسی پایه و شکاف در کاهش تنش‌های برشی بستر را با شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار فلوئنت

همکاران (Grimaldi *et al.*, 2009) در زمینه آبشستگی مطالعات تجربی گسترده‌ای کرده‌اند. برای نمونه، ملویل (Melville, 1975) نشان داد آبشستگی از وجه کناری پایه و در زاویه‌ای حدود ۸۰ درجه نسبت به جهت جریان آغاز می‌شود و به سمت بالادست و پایین‌دست پایه گسترش می‌یابد.

در زمینه مطالعه عددی می‌توان به نمونه‌هایی از شبیه‌سازی الگوی جریان پیرامون پایه‌های پل اشاره کرد. رودی (Rodi, 1997) جریان اطراف پایه با مقطع مربعی را با استفاده از دو مدل آشفتگی $RANS$ ^۱ و LES مقایسه کرده و نشان داد که مدل LES کارآمدتر از مدل‌های $RANS$ است. تسنگ و همکاران (Tseng *et al.*, 2000) با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی، الگوی جریان اطراف پایه استوانه‌ای را با استفاده از روش حجم محدود شبیه‌سازی و از مدل آشفتگی LES برای اعمال اثر آشفتگی استفاده کردند و نتیجه گرفتند افزایش قطر پایه موجب افزایش ضریب‌های دراگ و لیفت می‌شود و طول گردابه‌های برخاستگی پشت پایه افزایش می‌یابد. فرولیچ و رودی (Frohlich & Rodi, 2004) با استفاده از مدل LES جریان اطراف پایه با مقطع دایره‌ای را بررسی و نتایج عددی به دست آمده را با نتایج تجربی تحقیقات کاپلر (Kappler, 2002) مقایسه کردند و دریافتند استفاده از شبکه‌های بزرگ در شبکه‌بندی میدان محاسباتی موجب خواهد شد تا شبیه‌سازی ناحیه برگشتی جریان در پایین‌دست پایه دقیق نباشد. صلاح‌الدین و همکاران (Salaheldin *et al.*, 2004) به صورت عددی و با استفاده از دو مدل آشفتگی ویسکوزیته گردابی^۲ و تنش رینولدز^۳، نیمرخ سرعت در عمق جریان، تغییرات سطح آزاد آب، الگوی جریان و توزیع تنش‌های برشی بستر در پیرامون پایه را به دست آوردند و با نتایج آزمایشگاهی ملویل (Melville, 1975) مقایسه کردند. رولند و همکاران

1- Large Eddy Simulation (LES)

2- $k - \varepsilon$ Model

3- Reynolds Stress Model (RSM)

همواره امکان بررسی مدل‌ها به صورت تجربی وجود ندارد. در پژوهش پیش رو مطالعات در دو فاز تجربی و عددی دنبال شد تا با مقایسه نتایج به دست آمده از این دو، از صحت نتایج عددی اطمینان حاصل شود. هدف دوم از پژوهش حاضر بررسی تأثیر مقطع هندسی پایه پل بر آغاز و گسترش فرسایش بستر پیرامون آنها است. در این راستا، مدل‌های انتخابی در سه گروه بررسی شدند: گروه اول مدل‌های دوکی با ابتدا و انتهای تیز، گروه دوم بررسی مدل‌های با ابتدا و انتهای تیز (ترکیب مستطیل با مثلث) که شیب آنها ۴۵ درجه است و گروه سوم مدل‌های با ابتدا و انتهای گرد (ترکیب مستطیل با نیم‌دایره). در هر گروه ترکیب هندسه ابتدا و انتهای مدل نیز بررسی می‌شود که در مجموع ۱۰ مدل آزمایش خواهد شد.

مواد و روش‌ها

نرم‌افزار فلوننت

نرم‌افزار فلوننت برای شبیه‌سازی جریان سیال در هندسه‌های پیچیده نرم‌افزاری است مناسب که اساس کار آن روش حجم محدود است و این نوع جریان‌ها را شبیه‌سازی می‌کند: جریان‌های تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر، پایا و گذرا، لزج، ورقه‌ای، و متلاطم، سیال‌های نیوتنی و غیر نیوتنی، دو فازی، چند فازی و دارای سطح آزاد با شکل‌های سطح پیچیده. در این نرم‌افزار از تکنیک عددی حجم سیال^۱ (VOF) برای مدل‌سازی سطح آزاد استفاده شده است و معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته می‌شوند. معادلات اساسی نرم‌افزار فلوننت، معادلات ناویراستوکس هستند که در واقع بقای جرم و مومنتم به شکل ریاضی بیان می‌کنند (روابط ۱ و ۲). در ادامه، فرم ریاضی معادلات ناویراستوکس برای سیال تراکم‌ناپذیر و از نوع نیوتنی، در حالت سه‌بعدی بیان شده است (Salaheldin *et al.*, 2004):

بررسی کردند و نشان دادند که استفاده از شکاف در پایه استوانه‌ای موجب کاهش تنش برشی می‌گردد؛ در مقاطع هندسی نیز استفاده از مقطع بیضی شکل به دلیل انطباق با الگوی جریان، تأثیر قابل توجهی بر کاهش تنش برشی دارد.

روش‌های مناسب جهت کاهش و کنترل عمق آبشستگی از مسائلی است که از دیرباز مورد توجه محققان بوده است. یکی از این روش‌ها استفاده از شکل پایه‌هایی است که تأثیر کمتری بر تغییر الگوی جریان اطراف آنها داشته باشد. تأثیر شکل پایه پل بر آبشستگی موضعی را بسیاری از محققان مانند لارسن و تاچ (Laursen & Toch, 1956)، بروسرز و رودکیوی (Breusers & Raudkivi, 1991)، دی و همکاران (Dey *et al.*, 1995) و ملویل و کولمن (Melville & Coleman, 2000) بررسی کرده‌اند. دیسدل (Drysdale, 2008) به صورت تجربی و عددی تأثیر پایه دوکی شکل را بر کاهش گردابه‌های پیرامون پایه بررسی و نتایج به دست آمده را با پارامترهای هیدرودینامیکی پایه استوانه‌ای مقایسه کرد و نشان داد که استفاده از مقطع دوکی شکل موجب تضعیف گردابه‌های برخاستگی خواهد شد که در نتیجه از عمق آبشستگی در پشت پایه کاسته می‌شود؛ اما این پایه تأثیری بر کاهش فرسایش بستر بالادست پایه ندارد. حسن‌زاده و همکاران (Hassanzadeh *et al.*, 2012) با بررسی اثر شکل پایه بر تشکیل گردابه‌ها و تنش‌های برشی اطراف پایه به صورت عددی نشان دادند که پایه‌های نوک پهن واقع در مسیر جریان بیشترین عمق آبشستگی را ایجاد می‌کند در حالی که در پایه‌های نوک تیز، سیستم گردابه‌های نعل‌اسبی در نوک پایه ضعیف است و عمق آبشستگی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

آبشستگی پدیده‌ای است پیچیده و شبیه‌سازی تجربی آن به تجهیزات آزمایشگاهی گسترده‌ای نیاز دارد، از این رو

معادله بقای جرم (پیوستگی):

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

معادله بقای اندازه حرکت (مومنتم):

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

که در آن،

u_i = مولفه سرعت در جهت i ; ν = لزوجت مولکولی سیال؛ ρ = چگالی سیال؛ و P = مقدار فشار نسبی در هر نقطه از سیال.

اندیس i بیانگر جهت i در مختصات کارتزین است که طول کانال در این راستا تعریف شده است؛ این روابط در دو جهت z (عرض کانال) و k (ارتفاع کانال) نیز نوشته می‌شود. روابط ۱ و ۲ برای تحلیل جریان‌های ورقه‌ای هستند. برای تحلیل جریان‌های آشفته، نوسانات لحظه‌ای کمیت‌های میدان جریان در هر لحظه باید در روابط فوق اعمال شوند. با استفاده از متوسط‌گیری زمانی، روابط فوق به شکل روابط ۳ و ۴ بازنویسی می‌شوند (Salaheldin et al., 2004):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + g x_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) \quad (4)$$

در اینجا عبارت $\overline{\rho u'_i u'_j}$ تنش رینولدز است؛ این تنش بر سیال عمل می‌کند و اثر آشفتگی را در جریان اعمال خواهد کرد. مقدار $\overline{\rho u'_i u'_j}$ مستقیماً به مقدار ویسکوزیته آشفتگی (μ_t) بستگی دارد. برای تعیین تنش‌های رینولدز

می‌توان از مدل‌های آشفتگی متفاوتی استفاده کرد. به‌طور کلی این مدل‌ها را می‌توان به سه دسته مدل‌های صفر معادله‌ای^۱، مدل‌های یک معادله‌ای^۲ و مدل‌های و معادله‌ای^۳ تقسیم‌بندی کرد. مدل‌های صفر معادله‌ای تنها از روابط و معادلات جبری جهت توصیف رابطه بین μ_t و خواص محاسبه شده یا قابل اندازه‌گیری استفاده می‌کنند. مدل‌های یک معادله‌ای از یک معادله انتقال اضافی استفاده می‌کنند و مدل‌های دو معادله‌ای دو معادله دیفرانسیل جزئی^۴ انتقال اضافی دارند. انتخاب مدل آشفتگی مناسب بستگی دارد به فیزیک جریان، میزان دقت مورد نیاز، امکانات محاسباتی و مدت زمان مورد نیاز برای رسیدن به جوابی معقول.

تجهیزات آزمایشگاهی

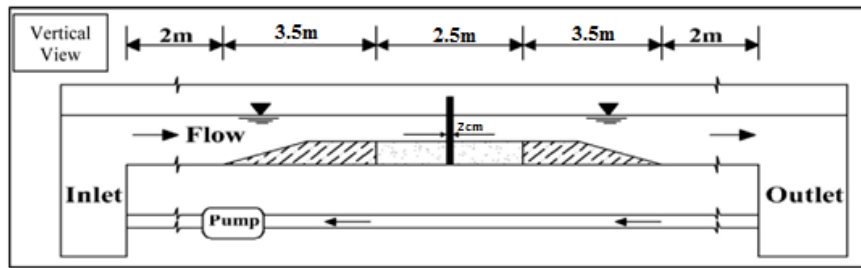
آزمایش‌ها در کانال مستطیلی به طول ۹ متر، عرض ۰/۲۵ متر، ارتفاع ۰/۵ متر و شیب کف ۰/۰۰۲۲ اجرا شده است. در قسمت ابتدایی و انتهایی کانال، مخزن وجود دارد. عمق آب در این کانال با دریچه کشویی انتهایی آن تنظیم می‌شود. آب مورد نیاز کانال با پمپی با بیشینه دبی ۶۰ لیتر بر ثانیه در یک مدار بسته تأمین شده است. کانال آزمایشگاهی به دو قسمت بستر ماسه‌ای و کف کاذب تقسیم شده است، بدین‌صورت که کف کانال با سکوه‌های فلزی به ارتفاع ۰/۱۴ متر و عرضی برابر با عرض کانال بالا آورده شده و منطقه بین سکوها، به طول ۲/۵ متر که ابتدای آن در فاصله ۳/۵ متری از ابتدای کانال قرار دارد، منطقه مورد آزمایش منظور شده است. نمایی از کانال آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری سرعت جریان، لوله پیتوت و برای اندازه‌گیری تراز سطح آب، ارتفاع‌سنج اولتراسونیک به‌کار برده شده است.

1- Zero Equation Model

2- One Equation Model

3- Two Equation Model

4- Partial Differential Equation (PDE)



شکل ۱- نمایی از بستر ماسه‌ای در مطالعه آزمایشگاهی

انتخاب پارامترها و ابعاد مدل

آبشستگی آب زلال در $U \leq 0.95U_c$ برقرار می‌گردد. با استفاده از معادلات ملویل (Melville, 1975) و ملویل و ساترلند (Melville & Sutherland, 1988)، عمق جریان مساوی ۱۶ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود تا نسبت $U/U_c = 0.72$ برقرار باشد. طبق نظر رادکیوی (Raudkivi, 1998) برای شرایط آزمایشگاهی عمق نسبی باید بزرگ‌تر از سه انتخاب گردد. با در نظر گرفتن شرط فوق، عمق جریان ۱۶ سانتی‌متر ($y/D = 8$) بر عمق آبشستگی بی‌اثر خواهد بود.

برای جلوگیری از اثر دیواره کانال بر میزان آبشستگی، از پایه‌های به قطر ۲ سانتی‌متر استفاده شده است. به منظور حذف تأثیر اندازه ذرات بر عمق آبشستگی، نسبت قطر پایه به میانگین اندازه ذرات باید بیشتر از ۵۰ باشد که با احتساب ۲ سانتی‌متر برای قطر پایه، قطر متوسط رسوبات ۰/۵۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (Raudkivi, 1998). برای حذف اثر غیریکنواختی ذرات، لازم است انحراف معیار هندسی ذرات (σ_g) کوچک‌تر از ۱/۳ باشد (Raudkivi & Ettema, 1983).

مدل پایه‌ها

پایه‌های مورد بررسی از جنس پلی‌اتیلن ساخته شده و ۹ مقطع هندسی متفاوت برای مدل‌ها انتخاب شده است. جدول ۱ مشخصات و مقاطع هندسی مدل پایه‌ها را نشان می‌دهد.

در این پژوهش از ماسه با دانه‌بندی یکنواخت و با مشخصات $G_s = 2.65$ ، $d_{50} = 0.56 \text{ mm}$ میلی‌متر، و $\sigma_g = 1.283$ استفاده شده است که خصوصیات آن در معیارهای بیان شده صدق می‌کند. انتخاب $U/U_c = 0.72$ ، مانع تشکیل ریپل به‌ازای $d_{50} < 0.16$ می‌شود. بر اساس بررسی‌های رادکیوی (Raudkivi, 1998) شرایط

جدول ۱- مقاطع هندسی مدل پایه‌های مورد بررسی در مطالعه تجربی

نام مدل	علامت اختصاری	شکل مدل	جهت جریان	L(mm)	d(mm)
دایره‌ای	مبنا		→	۲۰	۲۰
دوکی با انتهای تیز	A1		→	۷۷	۲۰
دوکی با ابتدای تیز	A2		→	۷۷	۲۰
مستطیلی با ابتدای تیز	B1		→	۷۷	۲۰
مستطیلی با انتهای تیز	B2		→	۷۷	۲۰
مستطیلی با ابتدا و انتهای تیز	B3		→	۷۷	۲۰
مستطیلی با ابتدای گرد	C1		→	۷۷	۲۰
مستطیلی با انتهای گرد	C2		→	۷۷	۲۰
مستطیلی با ابتدا و انتهای گرد	C3		→	۷۷	۲۰
مستطیلی	D		→	۷۷	۲۰

مدت زمان اجرای آزمایش‌ها

مدت زمان اجرای آزمایش‌ها برابر معیار کومار و همکاران (Kumar *et al.*, 1999) انتخاب شده است که عبارت است از مدت زمانی از آغاز آزمایش که پس از آن تغییرات عمق آبشستگی در یک دوره سه ساعته بیشتر از یک میلی‌متر نباشد. این مدت زمان به‌عنوان مدت زمان تعادل و عمق آبشستگی اتفاق افتاده در آن به‌عنوان عمق آبشستگی متعادل فرض شده است. از این‌رو مدت زمان اجرای آزمایش‌ها برای رسیدن به یک تعادل نسبی، از بررسی نتایج آزمایشگاهی مدل مینا تعیین شده است. در انتخاب این مدت زمان، محدودیت‌های مربوط به شبیه‌سازی عددی نیز مد نظر قرار گرفته است.

صحت‌سنجی مدل عددی

ساخت هندسه مدل و شبکه‌بندی

هندسه پایه، مشخصات کانال، رسوبات بستر و شرایط جریان در مدل عددی همانند با مدل فیزیکی در نظر

گرفته شد. برای کاهش مدت زمان تحلیل مدل عددی، طول کانال به ۲ متر در بالادست و ۴ متر در پایین‌دست پایه محدود و قطر پایه ۲ و ارتفاع جریان ۱۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. میزان دقت و نحوه شبکه‌بندی میدان محاسباتی روی همگرایی، دقت نتایج، پایداری حل و همچنین بر مدت زمان اجرای محاسبات مؤثر است اما دقت و نحوه شبکه‌بندی در نزدیکی مرزهای کانال و پایه اهمیت بیشتری دارد. با استفاده از نرم‌افزار پیش پردازنده GAMBIT، ابتدا چند نوع شبکه‌بندی با شکل‌های متفاوت و تعداد سلول مختلف ساخته و با در نظر گرفتن معیارهای دقت و سرعت همگرایی، شبکه‌بندی مناسب برای مدل مینا انتخاب گردید. برای بررسی تأثیر تعداد سلول‌ها بر نتایج، تغییرات سطح آزاد آب با سه تعداد سلول مختلف ۶۰۰۰۰، ۸۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰، مدل‌سازی و نتایج به‌دست آمده با نتایج تجربی مدل مینا مقایسه شد. جدول ۲، نتایج تأثیر تعداد سلول که بر حسب معیار کمترین خطای مربعات (RMSE) که فرمول آن در رابطه ۵ ارائه شده است، و نیز زمان همگرایی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- بررسی تأثیر تعداد سلول بر دقت نتایج بر حسب معیار خطای RMSE

تعداد شبکه	معیار خطای RMSE	مدت زمان همگرایی
۶۰۰۰۰	۰/۰۴۲۵	۹۶۰
۸۰۰۰۰	۰/۰۲۱۸	۱۱۴۰
۱۰۰۰۰۰	۱۱۴۰	۱۵۰۰

جدول ۲ نشان می‌دهد با ریزتر کردن سلول‌ها تا یک اندازه مشخص، جواب‌ها تغییر می‌یابد، اما پس از آن تغییر محسوسی در نتایج حاصل نمی‌گردد. بنابراین تعداد سلول در حدود ۸۰۰۰۰ انتخاب شده است. تعداد سلول‌های میدان محاسباتی در طول، عرض، و ارتفاع کانال به‌ترتیب برابر $14 \times 27 \times 192$ است. سایر مدل‌ها نیز بر اساس این شبکه‌بندی و مقتضیات هندسی هر مدل، شبکه‌بندی

شدند. شبکه‌بندی از نوع غیرمنشوری است و برای تحلیل دقیق جریان در مرزهای هندسی، شبکه در سه موقعیت نزدیک بستر، نزدیک سطح آزاد آب، و اطراف پایه، ریزتر انتخاب شده است.

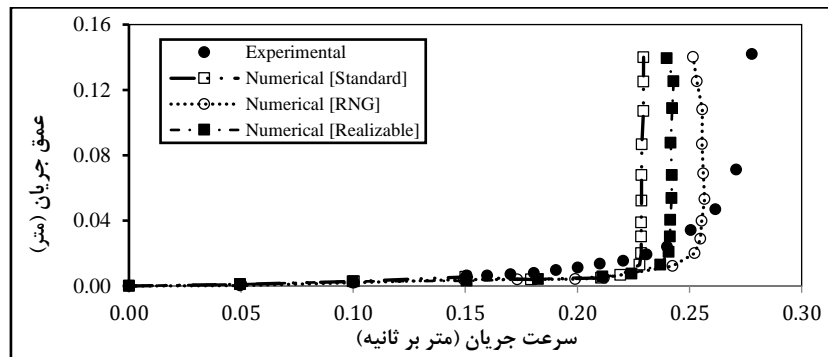
شرایط مرزی

در این مدل‌سازی، برای دیواره‌های کانال و

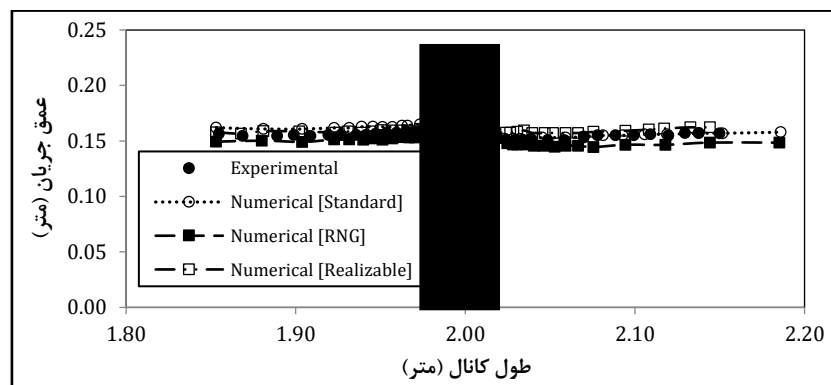
انتخاب مدل آشفتگی

در نرم‌افزار فلوئنت، مدل‌های آشفتگی مختلفی جهت اعمال اثر آشفتگی وجود دارد. هر مدل بسته به نوع، شرایط ناحیه جریان، و دقت مورد نظر، دارای مزایای خاص خود است و امکان معرفی مدلی که بتواند به صورت جامع و کلی برای انواع مسائل مناسب باشد، وجود ندارد (Kardan *et al.*, 2015). برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب، سه مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ (Standard)، $k-\varepsilon$ (RNG) و $k-\varepsilon$ (Realizable) بررسی شد که تا کنون نتایج قابل قبولی در شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان پیرامون پایه پل نشان داده‌اند. بدین منظور، نیم‌رخ سرعت جریان قبل از مدل ($x = -0.5D$) و تغییرات تراز سطح آب در اطراف مدل مینا، با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شدند (شکل‌های ۲ و ۳).

پایه پل، شرط مرزی دیوار استفاده شد که با توجه به دانه‌بندی مواد بستر و جنس پایه، ارتفاع زبری در نرم‌افزار اعمال گردید. برای ایجاد سرعت صفر جریان در سطوح دیوار، شرط عدم لغزش^۱ در تنظیمات این مرزها انتخاب شد. در مدل‌سازی کانال با استفاده از مدل جریان چند فازه، یک ناحیه دو فازی شامل آب و هوا تشکیل گردید که میزان عمق تعریف شده برای آب، ۰/۱۶ متر و ارتفاع مورد نظر برای هوا، ۰/۰۴ متر است و برای مدل‌سازی سطح آزاد آب، از روش عددی حجم سیال استفاده شد. قسمت ورودی کانال به دو بخش ورودی آب و هوا تقسیم شد؛ در ورودی آب، شرط مرزی سرعت با مقدار سرعت ۰/۲۳۵ متر بر ثانیه و در ورودی هوا، شرط مرزی فشار اعمال گردید. دبی جریان در کانال ۹/۵ لیتر بر ثانیه است.



شکل ۲- مقایسه مقادیر تجربی و عددی سرعت جریان قبل از پایه ($x = -0.5D$)



شکل ۳- مقایسه مقادیر تجربی و عددی تراز سطح آب در طول کانال

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_M - Y_P| \quad (7)$$

$$MARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_M - Y_P}{Y_M} \right| \times 100 \quad (8)$$

که در آنها،

$Y_{exp} =$ پارامتر اندازه‌گیری شده تجربی؛ \bar{Y}_{exp} = متوسط پارامتر اندازه‌گیری شده تجربی؛ $Y_{num} =$ پارامتر محاسبه شده عددی؛ و \bar{Y}_{num} = متوسط پارامتر محاسبه شده عددی.

نتایج ارزیابی سه مدل آشفتگی با چهار معیار خطا در جدول ۳ ارائه شده است.

برای ارزیابی دقت مدل‌های آشفتگی، از توابع جذر میانگین مربعات خطاها^۱ ($RMSE$)، ضریب همبستگی (R)، میانگین قدر مطلق خطاها^۲ (MAE) و میانگین قدر مطلق نسبت خطاها^۳ ($MARE$) (روابط ۵ تا ۸) استفاده شد (Roshangar & Rouhparvar, 2012):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_M - \bar{Y}_P)^2}{N}} \quad (5)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_M - \bar{Y}_M)(Y_P - \bar{Y}_P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_M - \bar{Y}_M)^2 \sum_{i=1}^N (Y_P - \bar{Y}_P)^2}} \quad (6)$$

جدول ۳- مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل‌های آشفتگی با نتایج تجربی

خطا				مدل	پارامتر
$MARE$	MAE	$RMSE$	R		
۱۳/۴۶	۲/۰۴۵	۲/۶۵۳	۰/۸۲۴	$k - \varepsilon(s \text{ tandard})$	سرعت جریان قبل از پایه (متر بر ثانیه)
۹/۵۴	۰/۹۸۸	۱/۲۲۸	۰/۹۵۳	$k - \varepsilon(RNG)$	
۱۹/۹۸	۵/۵۸۶	۶/۲۰۹	۰/۷۹۶	$k - \varepsilon(Realizable)$	
۲۳/۳۴	۲/۵۱۲	۳/۳۴۰	۰/۷۷۱	$k - \varepsilon(s \text{ tandard})$	تراز سطح آزاد آب (متر)
۱۱/۳۱	۱/۰۴۳	۱/۸۷۳	۰/۹۶۷	$k - \varepsilon(RNG)$	
۳۱/۵۶	۴/۸۰۹	۵/۱۱۲	۰/۷۵۸	$k - \varepsilon(Realizable)$	

آمده است. بنابراین، مدل آشفتگی $k - \varepsilon(RNG)$ در سایر شبیه‌سازی‌ها به کار گرفته شد.

تشابه هیدرولیکی و دینامیکی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر تطابق شرایط جریان در بالادست مدل فیزیکی، معیار اصلی در شبیه‌سازی مدل عددی است؛ از این رو اعداد فرود و رینولدز پایه در هر دو مدل فیزیکی و عددی باید برابر در نظر گرفته شوند. با معلوم بودن دبی جریان ۹/۵ لیتر بر ثانیه، عمق ۱۶ سانتی‌متر و

در بررسی سرعت جریان، مدل $k - \varepsilon(RNG)$ به دلیل داشتن R بالا و $MARE$ ، MAE و $RMSE$ پایین، قابلیت بالایی در شبیه‌سازی دقیق سرعت جریان قبل از پایه دارد؛ از این رو نتایج به‌دست آمده با این مدل آشفتگی، تطابق بیشتری با نتایج به‌دست آمده از مدل تجربی دارد. در این مدل مقدار ضریب همبستگی برابر ۰/۹۵۳، جذر میانگین مربعات خطاها برابر ۱/۲۲ متر بر ثانیه، میانگین قدر مطلق خطاها برابر ۰/۹۸۸ متر بر ثانیه و میانگین قدر مطلق نسبت خطاها برابر ۹/۵۴ درصد است. در بررسی تغییرات تراز سطح آزاد آب نیز نتیجه‌ای مشابه به‌دست

1- Root Min Square Error (RMSE)

2- Mean Absolute Error (MAE)

3- Mean Absolute Relative Error (MARE)

به دست آورد.

سرعت جریان نزدیک شونده ۰/۲۳۵ متر بر ثانیه در کانال آزمایشگاهی، عدد فرود و عدد رینولدز برای پایه و مدل به فرم روابط ۹ و ۱۰ محاسبه شد:

$$Fr_p = Fr_m = \frac{V}{\sqrt{gy}} = \frac{0.235}{\sqrt{(9.81)(0.16)}} = 0.187 \quad (9)$$

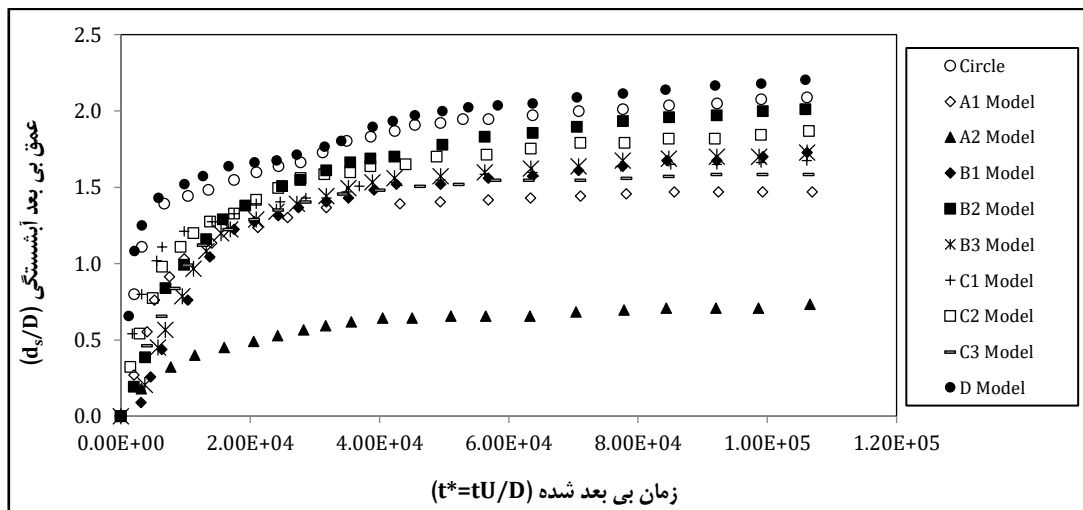
$$Re_p = Re_m = \frac{V.D}{\nu} = \frac{(0.235)(0.02)}{10^{-6}} = 4700 \quad (10)$$

که در آنها،

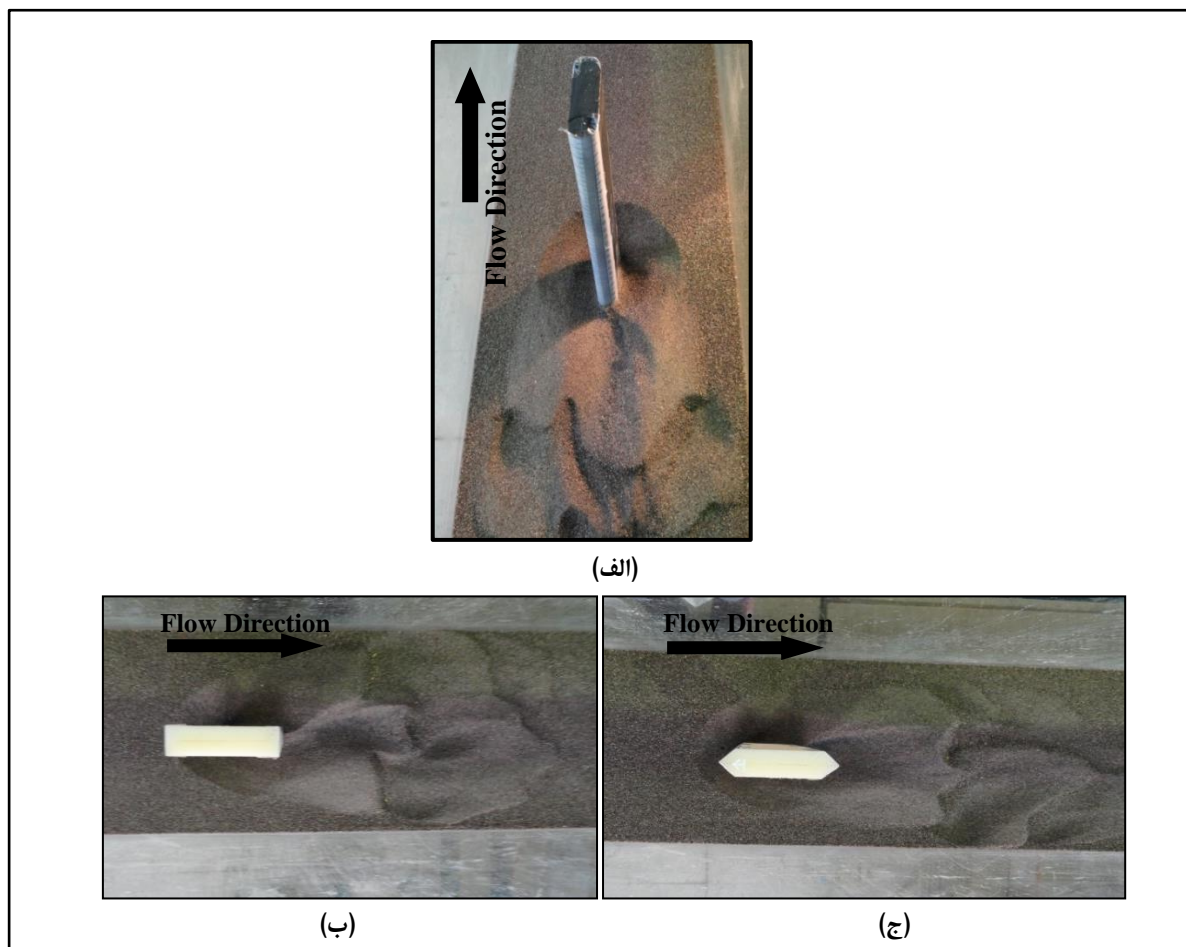
V = سرعت متوسط جریان در بالادست (متر بر ثانیه)؛
 y = عمق جریان (متر)؛ D = قطر پایه (متر)؛ و U = لزوجت سینماتیکی آب (متر مربع بر ثانیه).

با توجه به عدد فرود، جریان بالادست در هر دو مدل فیزیکی و عددی زیر بحرانی است و عدد رینولدز نیز برابر در نظر گرفته شده است. بنابراین، الگوی شکل گیری و نوسان گردابه ها و نیز جدایش جریان در هر دو مدل، یکسان خواهد بود. با توجه به شرایط فوق، می توان بین تنش برشی حاصل از نرم افزار فلونت و عمق تعادلی آبشستگی به دست آمده از آزمایش ها، رابطه ای منطقی

با توجه به محدودیت زمانی در شبیه سازی های عددی، زمان شبیه سازی ها ۲/۵ ساعت در نظر گرفته شد؛ با این همه لازم است تا تغییرات عمق آبشستگی در پیرامون پایه در بازه زمانی بیشتری بررسی گردد تا از برقراری تعادل نسبی در مدل های فیزیکی، اطمینان حاصل گردد. از این رو آزمایش روی مدل مینا، حدود ۸ ساعت به طول انجامید. با ترسیم منحنی تغییرات عمق فرسایش نسبت به زمان، مشاهده شد که بیشینه عمق فرسایش پس از ۲ ساعت، تغییر قابل توجهی ندارد و سرعت تغییرات آن در یک ساعت آخر برابر ۰/۵۷ میلی متر بر ساعت است. از این رو بازه زمانی ۲/۵ ساعت برای اجرای آزمایش ها در نظر گرفته شد. تغییرات زمانی بیشینه عمق آبشستگی برای مدل مینا و سایر مدل ها، در شکل ۴ ارائه شده است. جدول ۴، درصد کاهش عمق آبشستگی را در مدل ها نشان می دهد. در شکل ۵ فرسایش بستر پیرامون برخی از مدل ها برای نمونه آورده شده است.



شکل ۴- تغییرات زمانی بیشینه عمق آبشستگی برای مدل های مورد بررسی



شکل ۵- نمایی از فرسایش بستر پیرامون مدل‌های مورد بررسی در انتهای آزمایش
(الف) مدل C3، (ب) مدل D و (ج) مدل B3

جدول ۴- بیشینه عمق آبستگي و درصد کاهش آن نسبت به مدل مبنا

مدل پایه									پارامتر	
D	C			B			A			
D	C3	C2	C1	B3	B2	B1	A2	A1	مبنا	
۴۳	۳۱	۳۶	۳۰	۳۱	۳۶/۵	۳۱	۱۱	۲۸	۴۰	بیشینه عمق آبستگي (میلی‌متر)
-۷	۲۲/۵	۱۰	۲۵	۲۲/۵	۸/۷	۲۲/۵	۷۲	۳۰	---	درصد کاهش عمق آبستگي

کاهش یافته است. در مدل A2 صفحه تلاقی جریان با پایه یک خط قائم است و مقطع هندسی مدل، انطباق قابل توجهی با الگوی جریان نزدیک شونده به پایه دارد. از این رو به دلیل اینکه آشفتگی در خطوط جریان پیرامون این مدل به مقدار کمینه می‌رسد، کمترین عمق آبستگي در بالادست این مدل اندازه‌گیری شده است. کاهش عمق آبستگي در این مدل، بیشینه و برابر با ۷۲ درصد است.

در گروه A، کمترین مقدار عمق آبستگي ثبت شده است. در مدل A1 قسمت بالادست مدل، مشابه مدل مبنا و الگوی جریان در بالادست این مدل شبیه به الگوی جریان در مدل مبنا است. در پایین دست این مدل به دلیل انطباق با الگوی جریان، گردابه‌های برخاستگی تشکیل نمی‌شود. عمق آبستگي بیشینه در این مدل، ۲۸ میلی‌متر است که نسبت به مدل مبنا حدود ۱۲ میلی‌متر

فرسایش بسیار شدیدی دیده می‌شود. در این مدل، عمق آبخستگی به اندازه ۳ میلی‌متر نسبت به مدل مینا افزایش داشته است.

نتایج عددی

با توجه به اینکه آبخستگی پیرامون پایه‌ها شدیداً متأثر از مقدار تنش برشی است، میدان سه‌بعدی جریان اطراف پایه‌های با مقاطع هندسی مختلف شبیه‌سازی و اثر هر یک از مدل‌ها بر بیشینه و گسترده‌گی ناحیه تنش‌های برشی آغازکننده آبخستگی، بررسی شده است. در این راستا مقادیر تنش‌های برشی به دست آمده نسبت به تنش برشی بحرانی بی‌بعد شده‌اند. تنش برشی بحرانی با رابطه ۱۱ محاسبه شده است (Melville, 1975):

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} d_{\Delta} (\gamma_s - \gamma) g \quad (11)$$

که در آن،

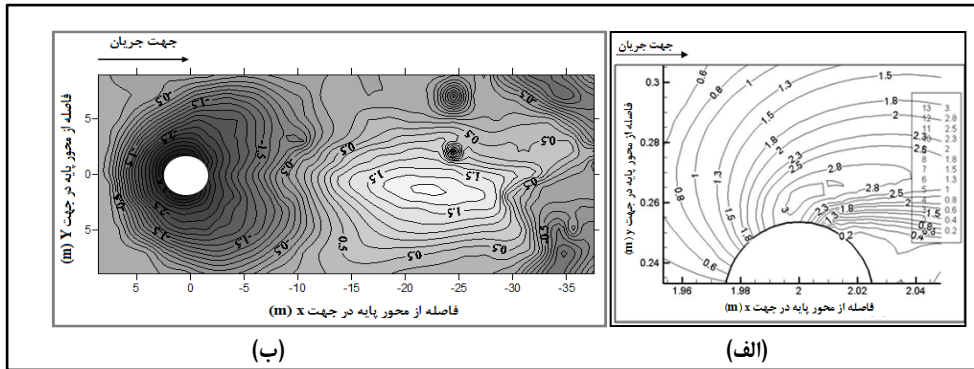
τ_{cr} = تنش برشی بحرانی (پاسکال)؛ θ_{cr} = عدد شیلدز بحرانی (بدون بعد)؛ d_{Δ} = قطر متوسط رسوبات (متر)؛ γ_s = وزن مخصوص رسوبات (نیوتن بر مترمکعب)؛ و γ = وزن مخصوص سیال آب (نیوتن بر مترمکعب).

عدد شیلدز بحرانی بر حسب قطر متوسط رسوبات (۰/۵۶ میلی‌متر) برابر ۰/۰۳ به دست آمده است. با جایگذاری مقادیر موجود در رابطه ۱۱، تنش برشی بحرانی برابر ۰/۲۷۱ پاسکال به دست می‌آید. شکل‌های ۶ تا ۱۱، خطوط هم‌تنش را برای مدل پایه‌های ارائه شده در جدول ۱ نشان می‌دهند. در کلیه شکل‌ها، ستون اول روی شکل تنش برشی بی‌بعد شده و ستون دوم مقادیر مطلق تنش برشی بر حسب پاسکال را نشان می‌دهد. جهت مقایسه بهتر روند کاهشی تنش برشی با عمق آبخستگی، منحنی‌های هم‌عمق آبخستگی نیز برای برخی از مدل‌ها ارائه شده‌اند.

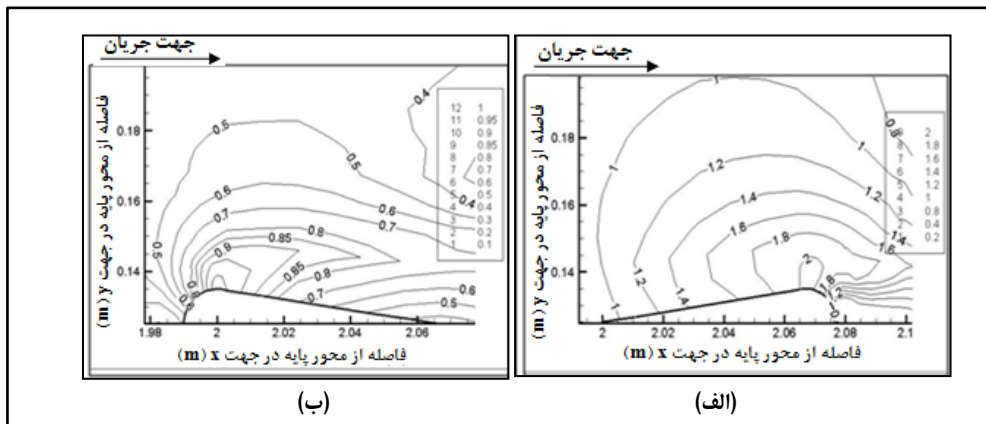
قابل توجه است که در پایین دست مدل A2 الگوی جریان، شبیه به الگوی جریان در پایین دست مدل مینا است.

در مدل B1، تیزی بالای مدل موجب کاهش فرسایش بستر تا ۹ میلی‌متر شده است. تیز بودن گوشه‌های مدل در محل اتصال مقطع مستطیلی به مثلثی، باعث تشدید جدایش جریان از لبه‌های این مدل شده است. در مدل B2، مقطع در مقابل جریان صفحه‌ای است راست که بیشترین مقاومت را در برابر جریان نزدیک‌شونده ایجاد می‌کند و موجب تشدید قابل توجه جدایش جریان در گوشه‌های آن می‌شود. بیشترین فرسایش بستر، نسبت به سایر مدل‌ها، در این مدل مشاهده شده است. در مدل B3 با ترکیب تیزی مقطع در بالادست و پایین دست، تغییری در بیشینه عمق آبخستگی حاصل نشده است، زیرا عمق آبخستگی تنها در بالادست مدل اندازه گرفته می‌شود.

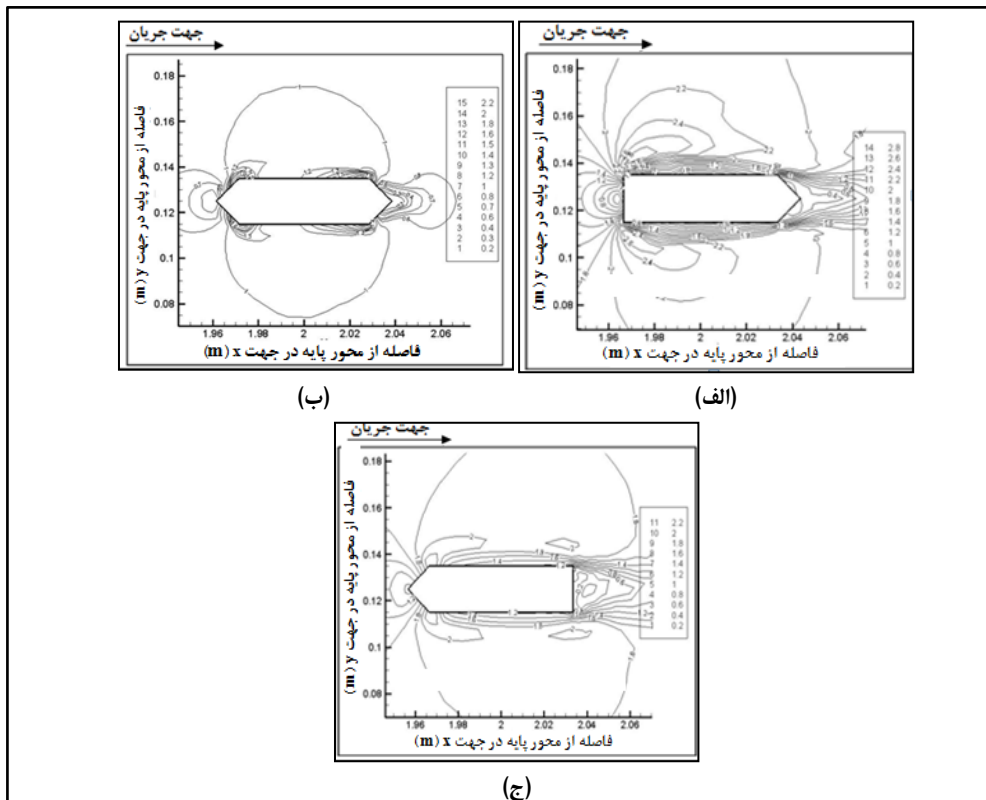
در مدل‌های گروه C انحنای مقطع در بالادست و پایین دست جایگزین تیزی مقطع مثلثی شده است؛ با ایجاد انحنای الگوی جریان تا حدود بسیار زیادی منطبق بر مقطع هندسی مدل است که می‌تواند جدایش جریان و فرسایش بستر را تا حدود زیادی کنترل کند. در مدل C1، انحنای مقطع باعث کاهش عمق آبخستگی به اندازه ۱۰ میلی‌متر شده است. این عدد قابل مقایسه با کاهش ۹ میلی‌متری آبخستگی در مقطع B1 است. اما در مدل C1، آشفستگی کمتری در خطوط جریان ایجاد می‌شود. در مدل C2، صفحه قائم بالادست، در برابر جریان مقاومت ایجاد می‌کند و موجب می‌شود تا آبخستگی در این مدل افزایش یابد. با این همه ترکیب انحنا در بالادست و پایین مدل C3، موجب بهبود وضعیت الگوی جریان پیرامون مدل می‌شود. مقطع مستطیلی در گروه D، در مقایسه با مدل مینا (مقطع دایره‌ای)، افزایش عمق آبخستگی را نشان داده است. در این مدل، مقاومت در برابر جریان بسیار شدید است و در گوشه‌های پایین دست مدل نیز جدایش و



شکل ۶- الف) خطوط هم‌تنش پیرامون مدل مبنا و ب) خطوط هم‌عمق آبستستگی برای مدل مبنا

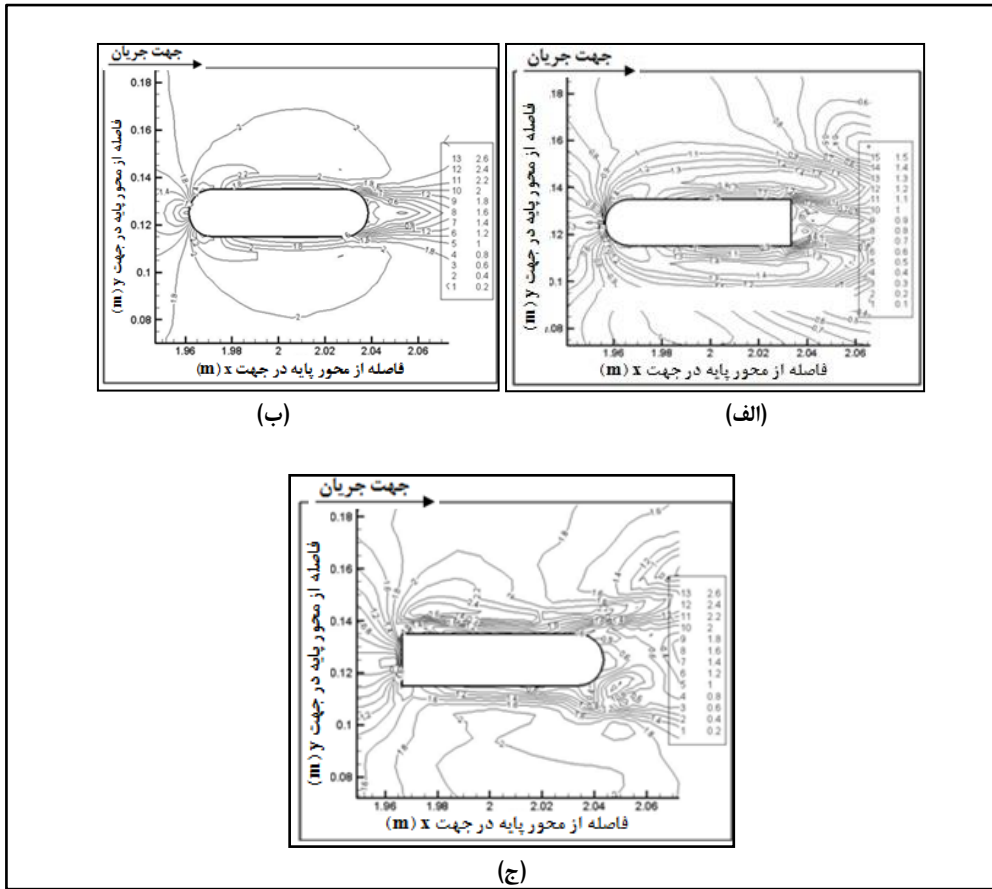


شکل ۷- خطوط هم‌تنش پیرامون مدل‌های گروه A: الف) مدل A1 و ب) مدل A2

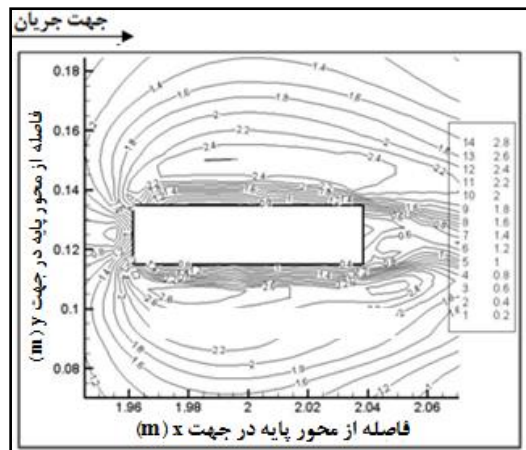


شکل ۸- خطوط هم‌تنش پیرامون مدل‌های گروه B: الف) مدل B3، ب) مدل B2 و ج) مدل B1

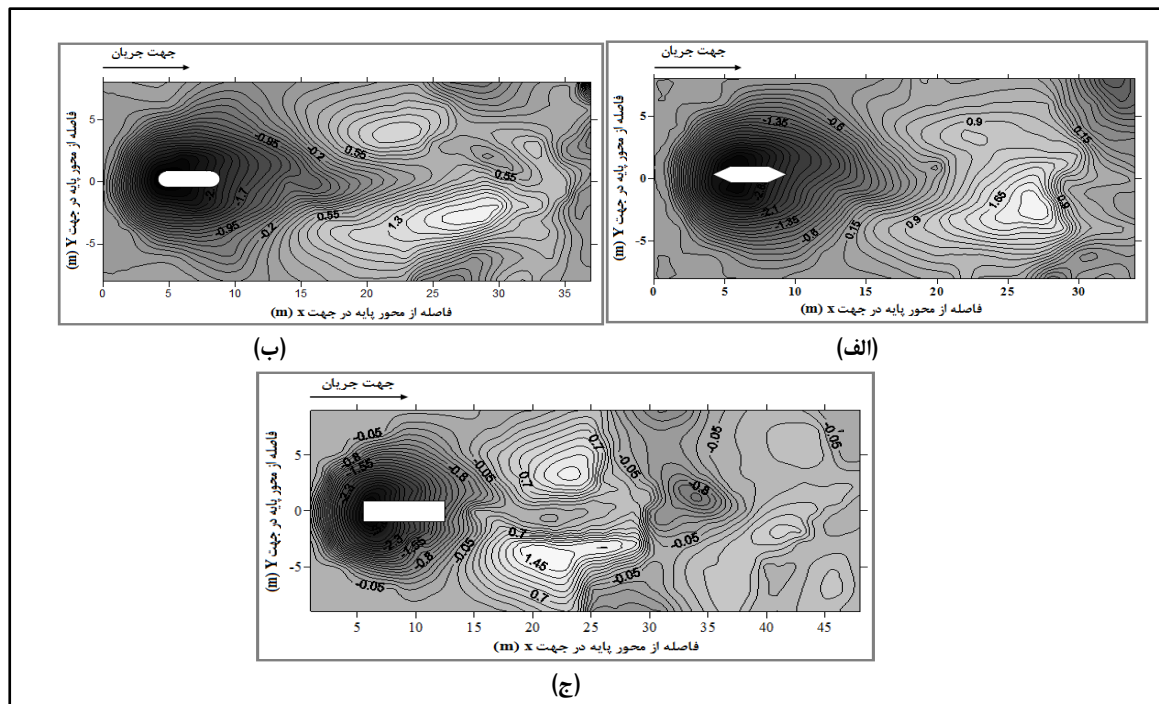
ارزیابی نتایج تجربی و عددی فرسایش بستر...



شکل ۹- خطوط هم تنش پیرامون مدل‌های گروه C: الف) مدل C3، ب) مدل C1 و ج) مدل C2



شکل ۱۰- خطوط هم تنش پیرامون مدل D



شکل ۱۱- خطوط هم‌عمق آبشستگی پیرامون مدل‌های الف (B3، ب) C3 و ج) D

و همین امر موجب گسترش حرکت مواد رسوبی از کناره‌های پایه به بالادست آن شده است. در سایر مدل‌ها نیز جابه‌جایی محل وقوع بیشینه تنش برشی با توجه به مقطع هندسی مدل کاملاً محسوس است.

برای بررسی درصد کارایی و تأثیر شکل پایه‌ها بر کاهش تنش‌های برشی، بیشینه تنش برشی به‌دست آمده برای هر مدل با مقدار حاصله برای مدل مبنا مقایسه و درصد کاهش آن ارائه شده است. جدول ۵ نتایج به‌دست آمده را نمایش می‌دهد. برابر این نتایج می‌توان استدلال کرد که هر چه میزان انطباق مقطع هندسی پایه با الگوی جریان بیشتر باشد، جدایش جریان از مرزهای پایه کمتر می‌شود و بیشینه تنش برشی نیز کاهش می‌یابد. به‌عنوان نمونه، در مدل با مقطع مستطیلی، با ایجاد انحنا در بالادست مدل (مدل C1) بیشینه تنش برشی بی‌بعد شده از مقدار $3/62$ به $2/32$ و با ایجاد تیزی از مقدار $3/62$ به $2/46$ کاهش یافته است. در جدول ۵، میزان گستردگی ناحیه تنش برشی بحرانی پیرامون هر مدل محاسبه شده است سپس در جدول ۶، نتایج عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.

بیشینه مقدار تنش برشی بحرانی برای مدل مبنا برابر ۳ است. بر حسب نمودارهای هم‌تنش، زاویه جدایش جریان برای این مدل حدود ۸۵ درجه نسبت به جهت جریان بالادست رخ می‌دهد. مطابق مطالعه اسچلینگ و گستن (Schlichting & Gersten, 2000)، محل جدایش جریان از مدل استوانه‌ای در زاویه ۸۰ درجه مشاهده می‌شود، از این‌رو در لحظات آغازین آبشستگی، بیشینه تنش برشی در محل جدایش جریان است و حرکت مواد رسوبی بستر نیز از این ناحیه آغاز می‌شود و به سمت بالادست و پایین‌دست مدل ادامه می‌یابد. در پایه‌های با مقاطع هندسی مختلف، محل وقوع تنش برشی ضرورتاً در این زاویه نیست و با توجه به هندسه مدل، محل وقوع آن به بالادست یا پایین‌دست پایه جا به جا می‌شود. در شکل‌های ۷ و ۸، جابه‌جایی محل وقوع بیشینه تنش برشی قابل مشاهده است. در شکل ۸ (ب) با توجه به مقطع هندسی مدل، جدایش جریان در پایین‌دست پایه و دور از لبه تیز آن اتفاق می‌افتد؛ از این‌رو آبشستگی به پایین‌دست پایه گسترش یافته و مقدار آن در بالادست کمترین است. در شکل ۹، جدایش جریان در مرز بالادست پایه رخ داده

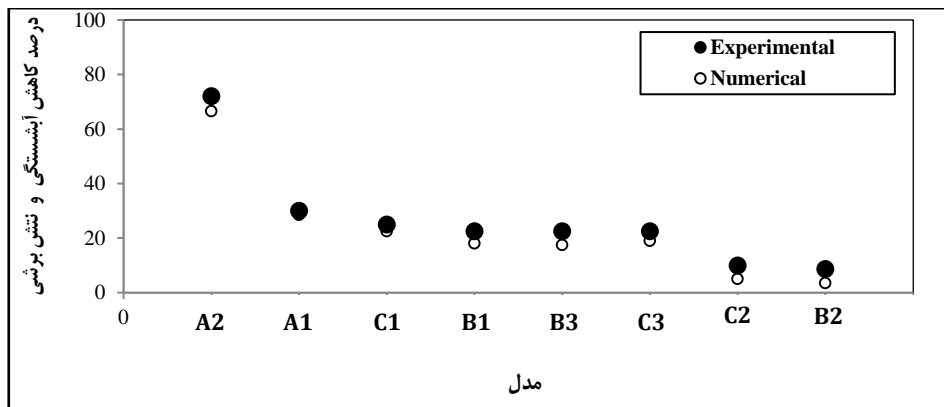
جدول ۵- بیشینه تنش برشی پیرامون هر مدل و درصد کاهش آن نسبت به مدل مبنا

نام مدل	مبنا	A1(x2)	A2(x2)	B1(x2)	B2(x2)	B3(x2)	C1(x2)	C2(x2)	C3(x2)	D(x2)
بیشینه تنش برشی (پاسکال)	۳	۲/۱۵	۱	۲/۴۶	۲/۹۳	۲/۴۸	۲/۳۲	۲/۸۵	۲/۴۳	۳/۶۲
درصد کاهش تنش برشی	---	۲۸/۵	۶۶/۶	۱۸	۳/۳	۱۷/۵	۲۲/۵	۵	۱۹	-۱۷
ناحیه گسترده تنش برشی (سانتی متر مربع)	۲۷/۵۴	۱۹/۲۳	۱۳/۴۸	۳۲/۶۱	۴۷/۹۱	۳۷/۴۹	۲۷/۰۳	۴۱/۰۵	۳۰/۳۸	۴۳/۶۱

جدول ۶- مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی

پارامتر	مدل									
	D	C3	C2	C1	B3	B2	B1	A2	A1	مبنا
درصد کاهش عمق آبستنگی	-۷	۲۲/۵	۱۰	۲۵	۲۲/۵	۸/۷	۲۲/۵	۷۲	۳۰	---
درصد کاهش تنش برشی	-۱۷	۱۹	۵	۲۲/۵	۱۷/۵	۳/۵	۱۸	۶۶/۵	۲۸/۵	---

نتایج به دست آمده برای کاهش عمق آبستنگی (از عددی دارند. شکل ۱۲ همسو بودن کاهش عمق آبستنگی مدل فیزیکی) تطابق خوبی با نتایج به دست آمده از مدل با کاهش بیشینه تنش برشی بستر را نمایش می دهد.



شکل ۱۲- مقایسه بیشینه عمق آبستنگی و تنش برشی برای مدل های با مقاطع هندسی مختلف

نتیجه گیری

جریان، انواع مدل های $k - \epsilon$ انتخاب و برای مقایسه کارایی آنها نیمرخ سرعت جریان قبل از پایه و تغییرات تراز سطح آب، با مقادیر تجربی مقایسه شدند. نتایج به دست آمده نشان داده است که با استفاده از مدل $k - \epsilon(RNG)$ ، نتایج عددی همسو با نتایج تجربی حاصل می گردند. در ادامه نیز درصد کاهش بیشینه تنش برشی بحرانی با درصد کاهش عمق آبستنگی در مدل فیزیکی

در پژوهش حاضر میدان جریان اطراف پایه های پل با مقاطع هندسی مختلف، به صورت سه بعدی و به کمک نرم افزار فلوئنت شبیه سازی و تأثیر هر یک از مدل ها بر کاهش تنش برشی بستر بررسی شد. مدل های انتخابی در آزمایشگاه به صورت تجربی بررسی شدند. با توجه به اهمیت مدل آشفتگی در اعمال آشفتگی های خطوط

مقایسه شد. مدل‌سازی‌ها همسو بودن نتایج عددی با نتایج فیزیکی را نشان داده‌اند؛ همچنین برای بررسی میزان کارایی هر مدل، منحنی‌های هم‌تنش پیرامون مدل‌ها که با توجه به تنش برشی بحرانی بی‌بعد شده‌اند، ترسیم و بیشینه مقدار به‌دست آمده با بیشینه تنش برشی بحرانی مدل مبنا مقایسه شدند. بیشترین درصد کاهش تنش برشی در مدل A2 (مقطع دوکی با ابتدای تیز) با مقدار ۶۷ درصد و کمترین درصد کاهش با مقدار ۳/۵ درصد در مدل B2 (ترکیب مقطع مستطیلی با مثلث، که مثلث در انتهای مقطع قرار گرفته است) دیده شده است. در مدل D (مقطع مستطیلی) نیز افزایش عمق آبشستگی و تنش برشی نسبت به مدل مبنا مشاهده شده است.

مراجع

- Ariyanfar, A., Shafaei-Bejestan, M. and Khosrojerdi, A. 2008. Investigation of shear stress distribution around slotted bridge piers by using Fluent. Proceeding of 7th Hydraulic Conference, Power & Water. 12-14 Nov. University of Technology (PWUT). Tehran, Iran. (in Persian)
- Baraniya, S., Olsen, N. R. B., Stoesser, T. and Sturm, T. 2012. Three-dimensional RANS modeling of flow around circular piers using nested grids. Eng. Appl. Comput. Fluid Mech. 6, 648-662.
- Breusers, H. N. C. and Raudkivi, A. J. 1991. Scouring-hydraulic structures design manual. IAHR, Rotterdam, Netherland.
- Dargahi, B. 1990. Controlling mechanism of local scouring. J. Hydraul. Eng. ASCE. 116(10): 1197-1214.
- Dey, S., Bose, S. K. and Sastry, G. L. N. 1995. Clear-water scour at circular piers: a model. J. Hydraul. Eng. ASCE. 121(12): 869-876.
- Drysdale, D. M. 2008. The effectiveness of an aerofoil shaped pier in reducing downstream vortices and Turbulence. Ph. D. Thesis. University of Southern Queensland.
- Ettema, R. 1980. Scour at bridge piers. Ph. D. Thesis. Auckland University, Auckland, New Zealand.
- Frohlich, J. and Rodi, W. 2004. LES of the flow around a circular of finite height. Int. J. Heat Fluid Flow. 25, 537-548.
- Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. and Cardoso, A. H. 2009. Countermeasures against local scouring at bridge piers: slot and combined system of slot bed sill. J. Hydraul. Eng. ASCE. 135(5): 425-431.
- Hassanzadeh, Y., Hakimzadeh, H. and Ayari, S. 2012. Study the effects of bridge pier shape on the flow pattern using the Fluent software. Iran-Water Resour. Res. 7(4): 95-105 (in Persian)
- Hassanzadeh, Y., Kardan, N. and Hakimzadeh, H. 2015. 3D numerical studying into combined models of pier shape and slot in reducing the bed shear stresses starter of scouring around the bridge pier. J. Civil Environ. Eng. 44(4): 39-50. (in Persian)
- Kappler, M. 2002. Experimentelle untersuchung der umstromung von kreiszylinder mit ausgepragt dreidimensionalen effekten. Ph. D. Thesis. Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe. (in Germany)
- Kardan, N., Hakimzadeh, H. and Hassanzadeh, Y. 2015. 3D numerical simulation of hydrodynamic parameters around the bridge piers using various turbulence models. J. Irrig. Sci. Eng. 37(4): 39-54. (in Persian)
- Kumar, V., Rang-Raju, K. G. and Vittal, N. 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slot and collars. J. Hydraul. Eng. ASCE. 125(12): 1302-1305.
- Laursen, E. M. and Toch, A. 1956. Scour around bridge piers and abutments. Iowa Highway Research Board Bulletin, No. 4, Bureau of Public Roads, Iowa.
- Melville, B. W. 1975. Local scour at bridge sites. Ph. D. Thesis. Department of Civil Engineering, University Auckland. Report No. 117.
- Melville, B. W. and Sutherland, A. J. 1988. Design method for local scour at bridge piers. J. Hydraul. Eng. ASCE. 114(9): 1210-1226.

- Melville, B. W. and Coleman, S. E. 2000. Bridge Scour. Water Resources Publication LLC, Highlands Ranch, Colorado, U.S.A.
- Raudkivi, A. J. 1998. Loose Boundary Hydraulics. 3rd Ed. Rotterdam, Brookfield.
- Raudkivi, A. J. and Ettema, R. 1983. Clear water scour at cylindrical piers. J. Hydraul. Eng. ASCE. 103(10): 1209-1213.
- Rodi, W. 1997. Comparison of LES and RANS calculation of the flow around bluff bodies. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 69(71): 55-75.
- Roshangar, K. and Rouhparvar, B. 2012. Evaluation of artificial intelligence systems for simulation of bridge piers scouring in cohesive soils. Water Soil Sci. 23(3): 169-181. (in Persian)
- 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, 351-401.
- Salaheldin, T. M., Imran, J. and Chaudhry, H. 2004. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers. J. Hydraul. Eng. ASCE. 130(2): 91-99.
- Schlichting, H. and Gersten, K. 2000. Boundary Layer Theory. 8th Revised and Enlarged Edition. Springer, Berlin.
- Shen, H. W., Schneider, V. R. and Karaki, S. S. 1969. Local scour around bridge piers. J. Hydraul. Div. 95(6): 1991-1940.
- Tseng, M. H., Yen, C. L. and Song, C. S. 2000. Computational three-dimensional flow around square and circular piers. Int. J. Numer. Meth. Fluids. 34, 207-227.

Experimental and Numerical Investigation of Bed Erosion around Bridge Piers with Different Cross-Sections

N. Kardan^{*}, N. Hassanpour and A. H. Hoseinzade-Dalir

* Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran. Email: n.kardan@azaruniv.ac.ir

Received: 4 February 2016, Accepted: 18 October 2017

In present study, the effect of different cross-sections of bridge piers on reducing the bed erosion and the bed shear stress was experimentally and numerically evaluated. In experimental study, the bed erosion and the percentage of its resuction was calculated; also numerically, the flow around pier models was simulated three dimensionally, and the effect of each cross-section on reduction of bed shear stress was investigated. To determine the efficiency of suggested models, the circular model was selected as the reference model and the decreasing of maximum shear stresses in each model was compared with the decreased scour depth. Comparison of the velocity and water free surface profiles was conducted for verification of $k - \varepsilon$ turbulence models and results showed that with $k - \varepsilon(RNG)$ model, more accuracy can be obtained. Among the presented models, the A2 model with decreasing scouring depth of 72 percent as copared to the refference model, was found to be best and most effective model. Also the B2 model lead to 8 percent reduction in scouring depth and can be suggested as a model that has the least effect on scouring. The D model causes the scouring depth increase by 7 percent relative to the reference model. Comparison of the numerical and experimental results was another objective of this study due to the complexities of experimental researches. The results showed that there are direct relationship between the bed shear stress and the equilibrium scour depths.

Key Words: Bridge Pier, Numerical Modelling, Scouring, Shear Stress, Turbulence Model