

مطالعه عددی سه بعدی مدل های ترکیبی شکل پایه و شکاف در کاهش تنش های برشی آغاز کننده آبشستگی پیرامون پایه های پل

یوسف حسن زاده^{۱*}، نازیلا کاردان^۲ و حبیب حکیم زاده^۳

^۱ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشجوی دوره دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

چکیده

آبشستگی پدیده ای است که در اثر اندرکنش آب و خاک در مجاورت سازه های هیدرولیکی به وجود آمده و منجر به تخریب آن ها می گردد. لذا روش های مختلفی برای کنترل این پدیده پیشنهاد شده است. استفاده از شکاف در پایه پل ها، یکی از روش های نوین در کنترل آبشستگی موضعی می باشد. در پژوهش حاضر، شبیه سازی عددی سه بعدی میدان جریان اطراف پایه های پل با مقاطع دایره ای، مستطیلی با دماغه نیم دایره ای، بیضی و عدسی، در حالت بدون شکاف و شکاف دار، به کمک نرم افزار فلوئنت انجام شده است. عرض شکاف ها ۰/۲۵ قطر (عرض) پایه و طول آن ها دو برابر عرض انتخاب شده اند. در تمامی حالات شکاف در مجاورت بستر قرار دارد. به منظور تعیین میزان تأثیر مقطع هندسی پایه ها و ترکیب آن ها با شکاف، گسترده ای ناحیه تنش های برشی آغاز کننده آبشستگی موضعی پیرامون پایه ها و نیز بیشینه مقدار آن ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که پایه با مقطع هندسی عدسی، با کاهش ۴۳ درصدی تنش برشی بحرانی نسبت به پایه دایره ای ساده، مؤثرترین شکل پایه به شمار می رود. همچنین نقش حفاظتی شکاف در پایه مستطیلی با دماغه نیم دایره ای بیشتر می باشد؛ لیکن در مدل های ترکیبی مقطع هندسی پایه و شکاف، ترکیب مقطع عدسی با شکاف مستطیلی مجاور بستر، مؤثرترین مقطع در کاهش تنش های برشی بحرانی و به طبع آن کاهش عمق آبشستگی معرفی می گردد. **واژگان کلیدی:** آبشستگی، مقطع هندسی پایه، شکاف، نرم افزار فلوئنت، مدل آشفتگی.

۱- مقدمه

همه ساله پل های زیادی در سراسر جهان به دلیل در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی آن ها تخریب می شوند. عواملی نظیر تنگ شدگی مسیر جریان و ایجاد جریان های ثانویه در اطراف پایه ها، موجب فرسایش موضعی ذرات در اطراف پایه می شوند. وقوع آبشستگی موضعی یکی از دلایل عمده عدم پایداری پل ها و در نهایت شکست آن ها می باشد. بدین ترتیب روش های مناسب جهت کاهش و کنترل عمق آبشستگی از جمله مسائلی است که از دیرباز مورد توجه بوده است. این روش ها در دو فاز متفاوت شامل مقابله با فرسایش و از بین بردن عوامل فرسایش انجام می شوند. در بخش اول، با به کارگیری مواد و مصالح متفاوت مانند انواع سنگ چین های حفاظتی یا سنگریزه های حفاظتی در اطراف پایه پل سعی در جلوگیری از حرکات ذرات بستر می نمایند و در روش دیگر تلاش در جهت حذف عوامل فرسایش دهنده مانند جریان های ثانویه و گردابه های نعل اسبی شده است. در فاز دوم، روش های مختلفی جهت کنترل آبشستگی موضعی پیرامون پایه پل ها مورد استفاده قرار می گیرند که از آن جمله می توان به مقطع هندسی پایه و ایجاد شکاف

اشاره نمود. شکل های رایجی که برای پایه پل ها مورد استفاده قرار می گیرند در دو گروه پایه های نوک پهن و پایه های نوک تیز طبقه بندی می گردند. در پایه های نوک پهن، سیستم گردابه نعل اسبی قوی در نوک پایه ایجاد شده و حداکثر عمق آبشستگی در مقابل پایه مشاهده می گردد. در مقابل، سیستم گردابه نعل اسبی در نوک پایه های نوک تیز ضعیف بوده و حداکثر عمق آبشستگی در قسمت پایین دست پایه ها اتفاق می افتد. بنابر این می توان بیان کرد شکل پایه تأثیر قابل ملاحظه ای در شکل گیری یا حذف گردابه های نعل اسبی مقابل پایه و گردابه های برخاستی پشت پایه دارد [۱].

در سال های اخیر، مطالعات آزمایشگاهی و عددی بسیاری در زمینه مدل سازی جریان و آبشستگی موضعی اطراف پایه های پل انجام یافته است که در ادامه به تحقیقات انجام یافته در زمینه تأثیر مقطع هندسی پایه بر کاهش آبشستگی موضعی و نیز استفاده از نرم افزار فلوئنت در مدل سازی جریان اطراف پایه اشاره می گردد. Laursen و Toch [۲]، Dey و همکاران [۳]، Breusers و همکاران [۴] و Melville و Coleman [۵] از جمله محققینی بودند که به صورت آزمایشگاهی تأثیر شکل پایه

بلندمدت استفاده از شکاف در پایه‌های استوانه‌ای پرداختند. در این پژوهش، شکاف پایه در سه موقعیت قرارگیری و با طول و عرض‌های مختلف مطالعه گردیده و نشان داده شد که تأثیر افزایش عرض شکاف در کاهش آبشستگی بیشتر از افزایش طول شکاف می‌باشد. خدابخشی و همکاران [۱۷] به صورت آزمایشگاهی مطالعه تأثیر ارتفاع شکاف از سطح بستر و نیز زیر بستر را در دستور کار خود قرار دادند. ایشان دریافتند امتداد بیشتر شکاف در زیر تراز بستر رودخانه به نحو چشمگیری در کاهش آبشستگی بالادست پایه پل مؤثر می‌باشد. Hassanzadeh و همکاران [۱۸] ترکیب مقطع عرضی بیضی با شکاف قائم مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش شکاف‌های عرضی با ابعاد مختلف مدل‌سازی گردیده و معلوم گردید با افزایش عرض شکاف بر کارایی آن افزوده می‌گردد، لیکن مقطع مورد نظر از لحاظ سازه‌ای ممکن است قادر به تحمل تنش‌های وارده نباشد. نتایج تمامی تحقیقات را می‌توان به این صورت جمع بندی نمود که شکاف نزدیک بستر نسبت به شکاف سطح آب تأثیر بیشتری در منحرف نمودن جت‌های رو به پایین دارد. همچنین با افزایش طول شکاف بر تأثیر مثبت آن افزوده می‌گردد. طول شکاف‌های پیشنهادی نیز 1D و 1.5D می‌باشد. تأثیر میزان عرض شکاف از جمله پارامترهایی است که در این تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته و ثابت گردیده با افزایش عرض شکاف بر عملکرد مطلوب آن افزوده می‌گردد.

در زمینه مدل‌سازی عددی، پژوهش‌های بسیاری در زمینه‌های مختلف فرسایش بستر انجام یافته است. Ettema [۱۹] الگوی جریان اطراف پایه‌های پل با مقاطع مربعی، دایره‌ای و مستطیلی را به صورت سه بعدی و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت^۱ مدل‌سازی نموده و با مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی بیان نمود این نرم‌افزار توانایی بالایی در مدل‌سازی جریان‌های سه بعدی آشفته پیرامون پایه‌های پل دارد. Yang [۲۰] به کمک نرم‌افزار فلوئنت به مطالعه اثر مقیاس ابعاد کانال، ابعاد پایه، عمق جریان و پارامترهای هیدرولیکی، بر آشفستگی موضعی اطراف پایه‌های پل پرداخت. بشارتی [۲۱] و پوراحمدی [۲۲] مقاطع متغیر در ارتفاع را به صورت عددی با کمک نرم‌افزار فلوئنت مورد مطالعه قرار دادند. عیاری [۲۳] با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به بررسی تأثیر شکل پایه در کنترل آبشستگی پرداخت. نوری‌فر [۲۴] جریان سه بعدی اطراف پایه پل استوانه‌ای بدون شکاف و شکاف‌دار را با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت شبیه-

بر کاهش آبشستگی موضعی را مورد مطالعه قرار داده و نتیجه گرفتند مقاطعی که آشفستگی زیادی را در جریان به وجود نیاورده و جریان به آرامی از کنار آن‌ها عبور نماید، عملکرد بهتری نسبت به سایر مقطع دارند. در این راستا درگاهی در سال ۱۹۹۰ به صورت آزمایشگاهی مدل پایه‌های دایره‌ای و مربعی را مورد مقایسه قرار داد [۶]. همچنین در سال ۱۳۸۵ محمدی در آزمایشگاه به بررسی تأثیر شکل پایه پل در کاهش آبشستگی موضعی اطراف آن پرداخت. مقاطع انتخابی در این تحقیق مقاطع بیضی، دایره، مستطیلی و دوکی شکل بودند [۷]. Drysdale نیز در سال ۲۰۰۸ به صورت آزمایشگاهی به مطالعه شکل پایه دوکی پرداخته و نتایج حاصله را با مقطع دایره‌ای مقایسه نمود [۱].

در سال‌های اخیر نیز استفاده از شکاف در پایه پل به عنوان روشی جدید در زمینه کنترل آبشستگی مطرح گردیده است. هدف اصلی استفاده از شکاف، منحرف کردن جریان رو به پایین از بستر و کاهش قدرت برخورد جریان رو به پایین به بستر رودخانه است.

Chiew [۸] برای اولین بار ایده استفاده از شکاف در پایه‌های پل را مطرح نمود. Kumar و همکاران [۹] به صورت آزمایشگاهی به بررسی اثر استفاده از شکاف در کاهش آبشستگی پیرامون پایه‌های پل‌ها پرداختند. El-Razek و همکاران [۱۰] ایده استفاده از شکاف‌های افقی در ارتفاع پایه را ارائه نمودند. با مقایسه نتایج این آزمایشات با نتایج آزمایشگاهی شکاف‌های طولی، ثابت گردید شکاف‌های طولی عملکرد بهتری نسبت به شکاف‌های افقی دارند. نادری‌بنی [۱۱] نیز به صورت آزمایشگاهی عملکرد شکاف در پایه‌های دایره‌ای و مستطیلی گرد گوشه را مورد بررسی قرار داد. آقاخانی افشار [۱۲] و حیدرپور [۱۳] به صورت آزمایشگاهی مطالعاتی در زمینه استفاده از شکاف در پایه‌های پل انجام دادند. Christensen [۱۴] تأثیر شکاف مستطیلی در پایه پل دوکی شکل را مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه با توجه به قطر پایه و محدودیت عمق جریان، ایجاد شکاف با طول دو برابر قطر پایه امکان پذیر نبوده و لذا یک سوم عمق جریان برای طول شکاف بالای بستر استفاده شده و در زیر بستر نیز شکاف تا عمق رسوبات امتداد یافته است.

تأثیر استفاده از مدل ترکیبی شکاف و آب پایه در سال ۲۰۰۹ به صورت آزمایشگاهی توسط Grimaldi و همکاران [۱۵] نیز مطالعه گردید. نتایج نشان داده‌اند استفاده از شکاف در پایه‌های دایره‌ای ساده، تنها ۳۰ درصد عمق آبشستگی را کاهش داده است. لیکن با ترکیب شکاف و آب پایه، این کاهش به ۴۵ درصد رسیده است. Haji Mashhadi و همکاران [۱۶] به بررسی تأثیر

سازی نمود. در این شبیه سازی تاثیر شکاف های مستطیلی با نسبت های باز شدگی متفاوت و نیز شکاف های باز شونده و تنگ- شونده بر کاهش میزان آبشستگی مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا جهت صحت سنجی نتایج عددی از نتایج آزمایشگاهی آقاخانی افشار استفاده شده و ثابت گردید نتایج عددی و آزمایشگاهی اختلاف کمی با یکدیگر دارند [۲۴]. Esmaeili و همکاران [۲۵] استفاده از شکاف های زاویه دار نسبت به راستای اصلی جریان را به صورت عددی مورد تحلیل قرار دادند. در این مطالعه نرم افزار SSIM به کار گرفته شده و با صحت سنجی نتایج عددی نقش مثبت این نوع شکاف ها در کنترل آبشستگی پیرامون پایه های پل نشان داده شده است. مطالعه عددی تأثیر پایه پل شکاف دار بر میزان تنش برشی بستر به صورت عددی توسط چناری و ملکی [۲۶] نیز انجام گرفت. در این بررسی جهت شبیه سازی جریان، نرم افزار FLOW3D مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن هستند که با نزدیک شدن موقعیت شکاف به سطح آب و یا به بستر، بر میزان نقش حفاظتی شکاف در کنترل آبشستگی افزوده می گردد.

در این تحقیق، شبیه سازی سه بعدی میدان جریان اطراف پایه های استوانه ای بدون شکاف و شکاف دار با سه مقطع هندسی متفاوت، به کمک نرم افزار فلوئنت انجام گرفته است و تأثیر هر کدام از مقاطع پایه های پل بر میدان جریان اطراف پایه و نیز بیشینه و گستردگی ناحیه تنش های برشی آغاز کننده آبشستگی موضعی اطراف پایه پل مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت مقطع بهینه به لحاظ کاهش تنش برشی و در نتیجه کاهش میزان فرسایش بستر انتخاب شده است.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- نرم افزار فلوئنت

نرم افزار فلوئنت یک مدل مناسب برای حل مسائل پیچیده دینامیک سیالات می باشد و قادر است دامنه وسیعی از جریان سیالات را مدل کند. این نرم افزار امکان تغییر شبکه به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه های منظم و غیر منظم برای هندسه های پیچیده را فراهم نموده و به کاربر اجازه بهبود شبکه را می دهد. این نرم افزار به زبان C نوشته شده است و از تمامی توان و قابلیت انعطاف این زبان بهره می برد که نتیجتاً با استفاده از حافظه دینامیک و ساختار مناسب داده ها، کنترل انعطاف پذیر محاسبات را ممکن می سازد. نرم افزار فلوئنت برای شبیه سازی جریان های با سطح آزاد سه بعدی غیرماندگار کاربرد فراوانی دارد. در این نرم افزار تکنیک های عددی مختلفی برای مدل سازی

۲-۲- معادلات حاکم

۲-۲-۱- معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر جریان های آرام، معادلات پیوستگی و سه معادله مومنتم در جهت محورهای سه گانه مختصات می باشند که به معادلات ناویراستوکس معروفند:

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

معادله مومنتم در راستای i :

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

در روابط فوق، ρ چگالی سیال، u_i مؤلفه سرعت جریان در راستای i ، B_i نیروی حجمی وارد بر واحد جرم در راستای i ، p فشار کل و μ ویسکوزیته دینامیکی می باشد. روابط فوق برای جریانات آشفته نیز معتبر می باشند؛ لیکن نوسانات لحظه ای کمیت های میدان جریان در هر لحظه باید مدل گردند. مقادیر لحظه ای کمیت های سرعت و فشار و یا هر کمیت دیگری مانند ϕ به مقادیر متوسط و نوسانی تفکیک می گردند:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad p_i = \bar{p}_i + p'_i, \quad \phi_i = \bar{\phi}_i + \phi'_i \quad (3)$$

که متوسط زمانی کمیت ϕ را می توان به صورت زیر بیان نمود:

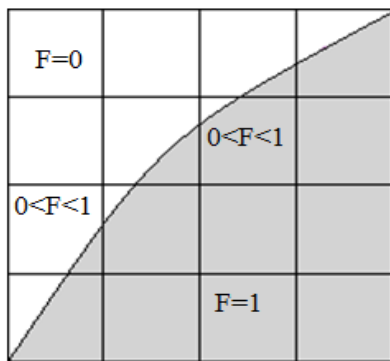
$$\bar{\phi}_i = \frac{1}{T} \int_0^T \phi_i dt \quad (4)$$

۲-۲-۲- معادله حاکم بر روش VOF

مدل VOF برای حالت‌هایی از جریان سیالات که در آن دو سیال مخلوط نشدنی در تماس بوده و سطح تماس آن‌ها حائز اهمیت است، طراحی شده است. از کاربردهای این مدل می‌توان به استفاده از آن در مدل‌سازی جریان‌های چند لایه‌ای، جریان‌های سطح آزاد، حرکت حباب‌های بزرگ در سیال، پیش‌بینی مسیر حرکت جت سیال و جریان بعد از شکست سد اشاره نمود. در تعیین سطح آزاد به روش VOF از یک تابع متغیر به نام F استفاده می‌شود که جزء حجمی سیال (VOF) نامیده می‌شود. شکل این تابع دیفرانسیلی در حالت سه‌بعدی چنین است:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

در حل معادله فوق، در سلولی که پر از سیال است مقدار F برابر ۱ می‌باشد. ولی در سلول‌های خالی از سیال این مقدار برابر صفر است. در سلول‌های سطحی این مقدار بین صفر و ۱ متغیر می‌باشد. در شکل (۱) تغییرات مقدار F در نقاط مختلف جریان به صورت شماتیک نشان داده شده است [۲۳].



شکل ۱- تغییر مقدار F در نقاط مختلف جریان

به هنگام استفاده از معادلات ناویراستوکس و معادله VOF، پارامترهای لزجت و چگالی سیال در هر سلول طبق روابط زیر معین می‌گردند:

$$\rho = \sum_{i=1}^n F_i \rho_i \quad (8)$$

$$\mu = \sum_{i=1}^n F_i \mu_i \quad (9)$$

در رابطه (۴) مقدار T آن‌قدر بزرگ انتخاب می‌گردد که برای مقادیر زمانی بزرگ‌تر از T ، تغییری در اندازه انتگرال مزبور مشاهده نشود. به عبارتی $\bar{\phi}_i$ مستقل از زمان انتخاب شده T باشد. با جایگذاری کمیت‌های لحظه‌ای در معادلات پیوستگی و مومنتم و متوسط‌گیری زمانی از طرفین معادله، روابط (۱) و (۲) بازنویسی می‌گردند:

معادله پیوستگی برای جریان‌های آشفته:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho}' u_i') = 0 \Rightarrow \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i) = 0 \quad (5)$$

به عبارتی برای جریان‌های آشفته تغییری در معادله پیوستگی ایجاد نمی‌گردد، به جز این که متغیرهای وابسته اکنون به صورت متوسط زمانی در بازه T درآمده‌اند.

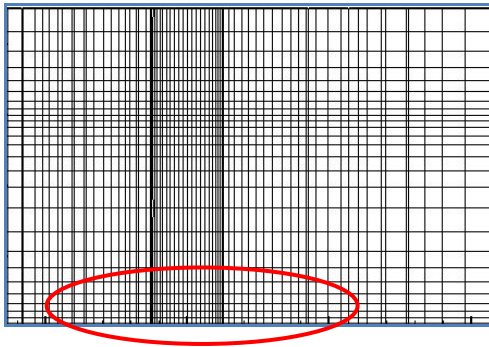
معادله مومنتم برای جریان‌های آشفته:

$$\rho \left(\frac{\partial (\bar{u}_i + u_i')}{\partial t} + (\bar{u}_j + u_j') \frac{\partial (\bar{u}_i + u_i')}{\partial x_j} \right) = \bar{B}_i - \frac{\partial (\bar{p} + p')}{\partial x_i} + \mu \left(\frac{\partial^2 (\bar{u}_i + u_i')}{\partial x_j \partial x_j} \right) \Rightarrow \rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \bar{B}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \bar{\rho} u_i' u_j' \right) \quad (6)$$

تنها تفاوت معادله مومنتم حاصله با معادله مومنتم جریان‌ات آرام، اضافه شدن ترم $\bar{\rho} u_i' u_j'$ می‌باشد که اصطلاحاً تنش آشفته‌گی یا تنش رینولدز نامیده می‌گردد. این ترم از لحاظ فیزیکی یک تنش نبوده بلکه بیانگر اثر تبادل اینرسی (مومنتم) می‌باشد.

تاکنون مدل‌های آشفته‌گی مختلفی ارائه شده‌اند که هر یک برای رژیم‌های خاص جریانی و حتی در ناحیه‌ای خاص از میدان جریان معتبر و دقیق می‌باشند. این مدل‌ها به طور کلی شامل مدل‌های ویسکوزیته گردابی^۱، مدل تنش‌های رینولدز RSM^۲ و مدل گردابه‌های بزرگ LES^۳ می‌باشند. هدف نهایی تمامی مدل‌های آشفته‌گی، محاسبه اندازه تنش رینولدز $\bar{\rho} u_i' u_j'$ در نقاط مختلف جریان می‌باشد [۲۹].

- 1- Eddy-viscosity
- 2- Reynolds stress model
- 3- Large eddy simulation



شکل ۲- استفاده از سلول‌های ریزتر در نزدیکی بستر و پیرامون پایه استوانه‌ای

۲-۴- شرایط مرزی

در حل‌های عددی، تعیین شرایط مرزی مناسب با توجه به نوع جریان و شرایط مسئله دارای اهمیت بالایی می‌باشد. در مدل‌سازی انجام شده، برای دیواره‌های کانال و نیز پایه پل شرط مرزی Wall استفاده شد که با توجه به دانه‌بندی مواد بستر کانال و نیز جنس پایه پل، میزان بلندای المان‌های زیری در نرم افزار اعمال گردیده است. به منظور ایجاد سرعت صفر جریان در سطوح Wall، شرایط No Slip در تنظیمات این مرزها انتخاب شد. به صفحات کمکی که در ایجاد هندسه مدل و در ورودی کانال در نظر گرفته شد، شرط مرزی Velocity اختصاص داده شد تا بدین ترتیب سرعت ورودی جریان 0.25 متر بر ثانیه در مرز ورودی اعمال گردد. در مدل‌سازی کانال با استفاده از مدل جریان چند فازه، یک ناحیه دو فاز شامل آب و هوا تشکیل شد که میزان عمق تعریف شده برای آب 0.15 متر بوده، لیکن این عمق برای هوا باید به گونه‌ای باشد که از هر گونه تأثیر ناحیه مرزی بالادست بر مدل ساخته شده جلوگیری گردد و بنابر این عمق هوا 0.08 متر در نظر گرفته شد. برای سطح فوقانی هوا نیز شرط مرزی متقارن Symmetry استفاده گردید.

۲-۵- انتخاب مدل آشفتگی

در نرم‌افزار فلوئنت مدل‌های آشفتگی مختلفی جهت اعمال اثرات آشفتگی وجود دارد. هر مدل، بسته به نوع و شرایط ناحیه جریان مدل‌سازی شده و دقت مورد نظر، دارای مزایای خاص خود می‌باشد؛ لیکن امکان معرفی مدلی که بتواند به صورت جامع و کلی برای انواع مسائل مناسب باشد وجود ندارد. برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب با توجه به تحقیقات صورت گرفته پیشین، دو مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و RSM که تاکنون نتایج قابل قبولی را در شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان پیرامون پایه پل نشان

۲-۳- هندسه مدل و شبکه‌بندی

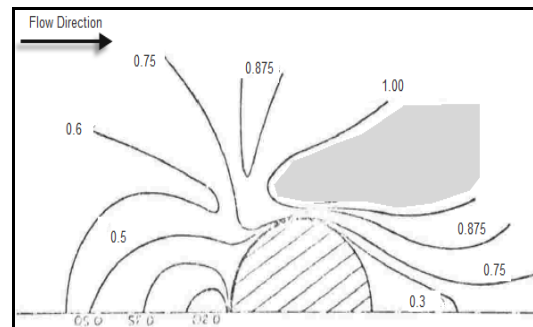
نظر به ضرورت انتخاب یک مدل آزمایشگاهی مناسب جهت صحت‌سنجی نتایج عددی، از آنجایی که پارامترهای مورد نیاز در مطالعه آزمایشگاهی Melville [۳۰] موجود می‌باشند، مدل تجربی Melville به عنوان معیار صحت نتایج عددی انتخاب می‌گردد. Melville مطالعات وسیعی را در مورد ناحیه جریان، آشفتگی‌ها، تنش‌های برشی بستر و گردابه‌های پیرامون پایه در شرایط نمونه‌های کوچک آزمایشگاهی با استفاده از پایه دایره‌ای، شرایط بستر صلب و جریان آب زلال به انجام رسانید که تاکنون مورد استناد محققین متعددی جهت مقایسه آزمایشات و مدل‌سازی‌های عددی قرار گرفته است. مدل موجود در کانالی به طول 19 متر و عرض 0.456 متر با دیواره‌های عمودی انجام شده است. میانگین عمق جریان 0.15 m بوده، میانگین سرعت جریان 0.25 m/s و پایه‌ای با مقطع عرضی دایره به قطر $5/1$ cm مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل عددی سه‌بعدی برای کاهش زمان محاسبات، کانال آزمایشگاهی به طول 6 متر در نظر گرفته شده و تعیین شده است که در طول 2 متری، جریان پیش از رسیدن به مانع به حالت توسعه یافته رسیده است. در نتیجه موقعیت پایه در 2 متری ابتدای کانال انتخاب گردیده است. نظیر چنین کاری توسط پژوهشگران دیگر از جمله Salaheldin و همکاران [۲۸] انجام شده است.

میزان دقت و نحوه شبکه‌بندی میدان محاسباتی بر روی همگرایی، دقت نتایج، پایداری حل و همچنین مدت زمان انجام محاسبات مؤثر است و در این میان میزان دقت در نحوه شبکه‌بندی در نزدیک مرزهای کف کانال و پایه پل از اهمیت بالاتری برخوردار می‌باشد. محاسبه دقیق جریان در ناحیه نزدیک جداره‌ها موجب می‌گردد مدل عددی بتواند جریان‌های آشفته دورتر از دیواره‌ها و تنش‌های ایجاد شده در کف کانال را نیز بهتر محاسبه نماید. لذا جهت انتخاب شبکه‌بندی مناسب و با استفاده از نرم‌افزار پیش‌پردازنده GAMBIT، چند نوع شبکه با شکل‌های متفاوت و تعداد سلول‌های متفاوت (طوری که شبکه در نزدیکی مرزهای جامد ریزتر می‌گردیدند (شکل (۲))، ساخته شده و نتایجاً با در نظر گرفتن معیارهای دقت و سرعت همگرایی جواب‌های حاصله، شبکه مناسب انتخاب گردید. سایر مدل‌ها نیز بر اساس این شبکه‌بندی و مقتضیات هندسی هر مدل، شبکه‌بندی شدند.

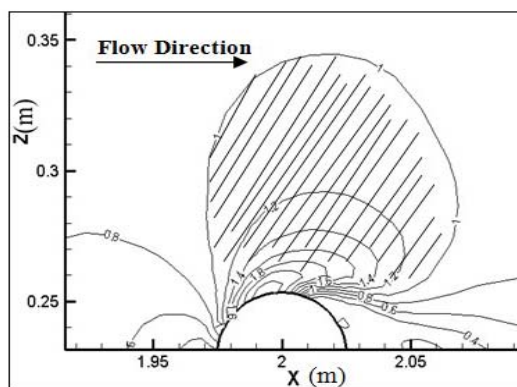
به منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل آشفتگی، تنش‌های برشی بحرانی در پیرامون پایه که با دو مدل آشفتگی فوق حاصل گردیده‌اند، با نتایج مدل تجربی Melville و مدل عددی Salaheldin و همکاران مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. شکل (۳) ناحیه گسترده‌ی تنش‌های برشی بحرانی پیرامون پایه با مقطع عرضی دایره در مطالعه تجربی ملویل را نشان می‌دهد.

نتایج حاصله از شبیه‌سازی عددی نیز در شکل‌های (۴) تا (۷) ارائه گردیده است. در شکل‌های مزبور نتایج مطالعه عددی حاضر با نتایج عددی و تجربی موجود مقایسه گردیده است. در تمامی شکل‌ها ناحیه گسترده‌ی تنش برشی بحرانی تطابق خوبی با نتایج عددی Salaheldin و همکاران دارد. از میان چهار مدل فوق، در دو مدل $k-\varepsilon$ RNG و RSM اختلاف کمی با نتایج تجربی و عددی دیده می‌گردد و بیشینه تطابق بین نتایج در مدل RSM قابل مشاهده است. لذا این مدل در سایر مدل‌سازی‌ها نیز به کار گرفته شد.

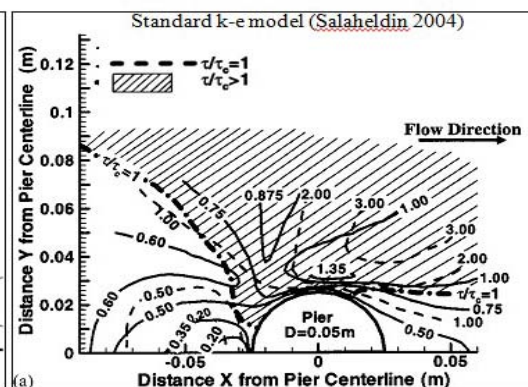
داده‌اند، مورد بررسی قرار گرفتند. در استفاده از مدل $K-\varepsilon$ سه مدل آشفتگی دو معادله‌ای Standard، RNG و Realizable و برای مدل RSM تنها زیر مجموعه Quadratic مطالعه گردیده است.



شکل ۳- ناحیه وقوع تنش‌های برشی بحرانی در مطالعه تجربی [۳۰] Melville

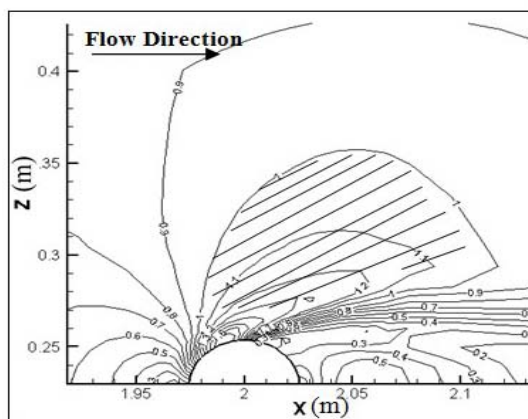


(ب)

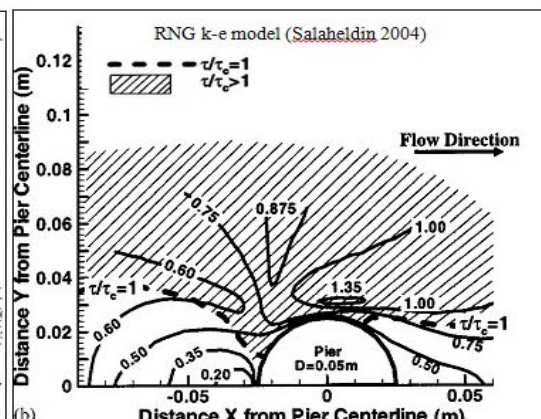


(الف)

شکل ۴- مدل آشفتگی Standard $k-\varepsilon$: (الف) مدل عددی Salaheldin و همکاران [۲۷]، (ب) مدل عددی حاضر

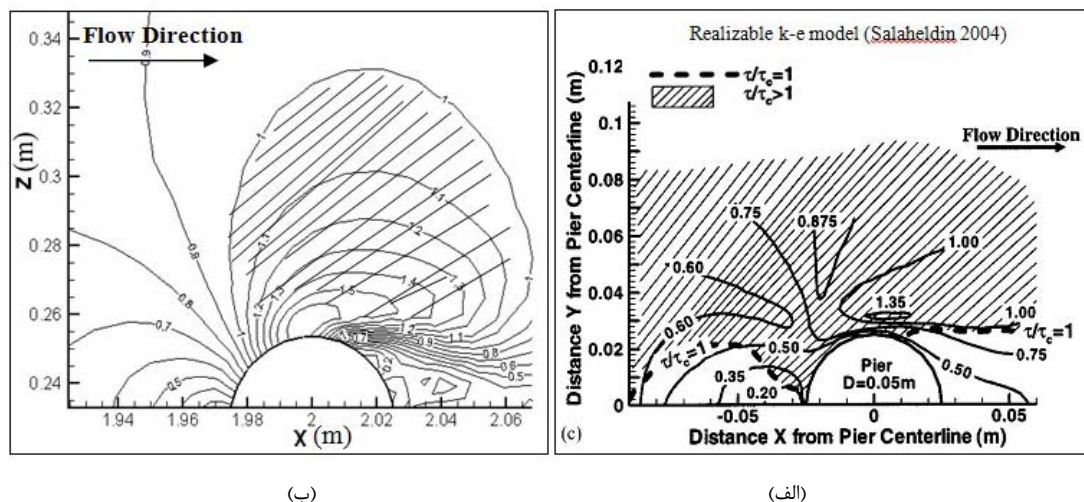


(ب)

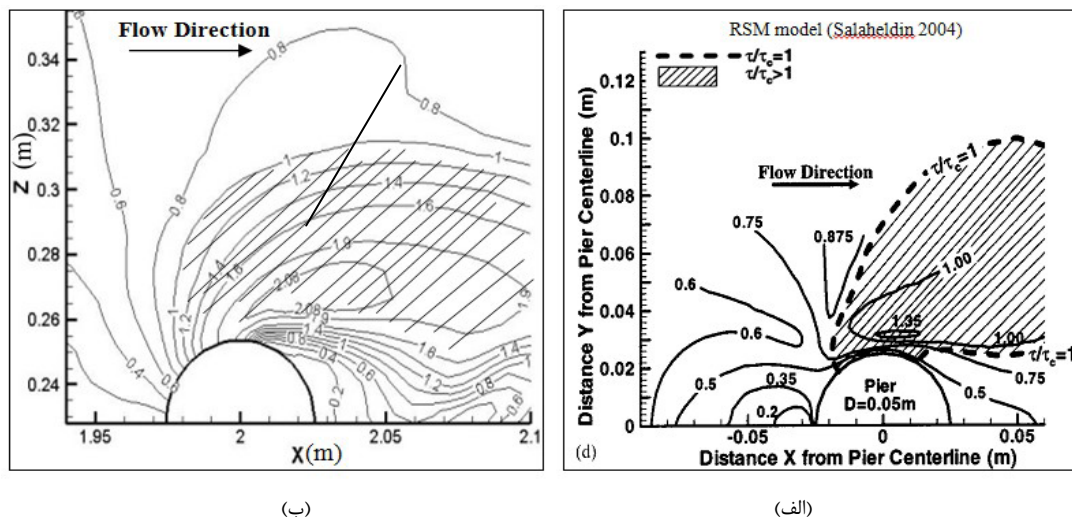


(الف)

شکل ۵- مدل آشفتگی RNG $k-\varepsilon$: (الف) مدل عددی Salaheldin و همکاران [۲۷]، (ب) مدل عددی حاضر



شکل ۶- مدل آشفتگی Realizable $k-\epsilon$: (الف) مدل عددی Saliheldin و همکاران [۲۷]، (ب) مدل عددی حاضر



شکل ۷- مدل آشفتگی RSM: (الف) مدل عددی Saliheldin و همکاران [۲۷]، (ب) مدل عددی حاضر

۳- مدل پایه‌های پل

۳-۱- پایه‌های بدون شکاف

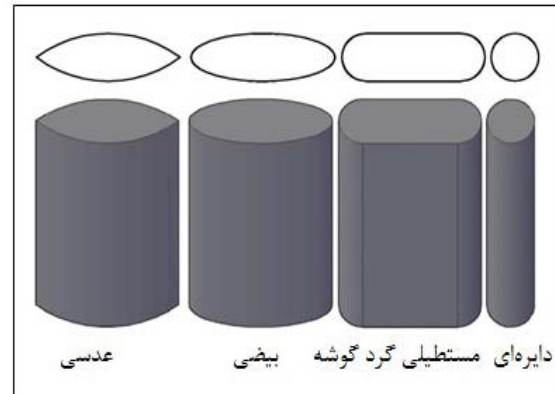
شکل‌های رایج مورد استفاده در پایه‌های پل، در دو گروه پایه‌های نوک‌پهن و پایه‌های نوک‌تیز طبقه‌بندی می‌گردند. در پایه‌های نوک‌پهن، سیستم گردابه نعل‌اسبی قوی در نوک پایه ایجاد شده و حداکثر عمق آبشستگی در مقابل پایه مشاهده می‌گردد. در مقابل، سیستم گردابه نعل‌اسبی در نوک پایه‌های نوک‌تیز ضعیف بوده و حداکثر عمق آبشستگی در انتهای پایین‌دست آنها اتفاق می‌افتد. بنابر این می‌توان بیان کرد شکل پایه تأثیر قابل ملاحظه‌ای در شکل‌گیری یا حذف گردابه‌های نعل‌اسبی مقابل پایه و گردابه‌های برخاستی پشت پایه دارد. لذا در ادامه پس از صحت‌سنجی نتایج عددی و انتخاب مدل آشفتگی مناسب، سه‌پایه به اشکال مستطیلی با دماغه نیم دایره‌ای، بیضی

و عدسی در نرم‌افزار پیش پردازنده GAMBIT مدل‌سازی شده است.

پایه مستطیلی با دماغه نیم دایره‌ای در گروه پایه‌های نوک‌پهن قرار گرفته و دو پایه بیضی و عدسی شکل در گروه پایه‌های نوک‌تیز قرار می‌گیرند؛ لیکن میزان تیزی نوک پایه در مقطع عدسی شکل بیشتر از پایه با مقطع بیضی می‌باشد. در سه مدل فوق، عرض پایه‌ها مساوی قطر پایه دایره‌ای ۵/۱ سانتیمتر و طول آنها سه برابر عرض پایه و مساوی ۱۵/۳ سانتیمتر لحاظ شده است. شکل (۸) نشان دهنده مدل پایه‌های انتخابی می‌باشد.

۳-۲- پایه‌های شکاف‌دار

آبشستگی موضعی اطراف پایه پل حاصل جریان رو به پایین ایجاد شده در وجه بالادست پایه و تنش برشی ایجاد شده در مجاورت کف کانال است. از این رو یکی از راهکارهای کاهش آبشستگی موضعی از بین بردن و یا تضعیف جریان روبه پایین و در نتیجه گردابه‌های نعل‌اسبی می‌باشد.

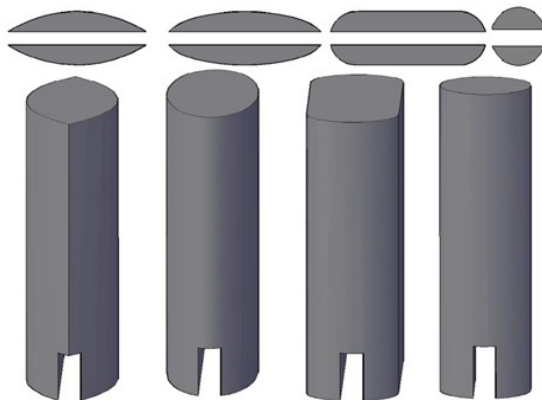


شکل ۸- شکل پایه‌های پل مورد مطالعه

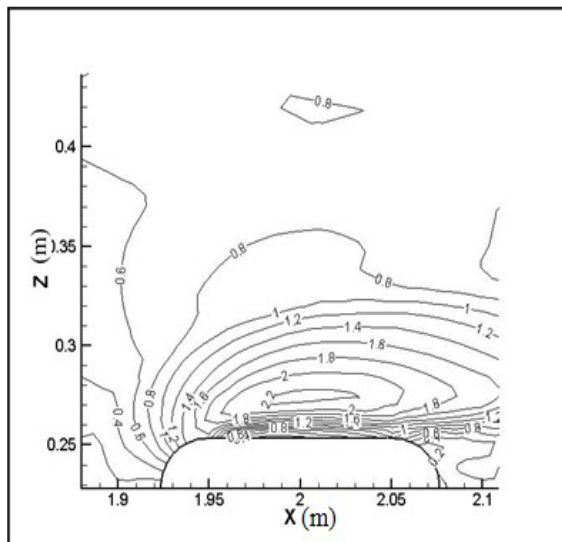
هدف اصلی استفاده از شکاف نیز منحرف کردن جریان روبه پایین و کاهش قدرت برخورد جریان رو به پایین است. عرض، طول و محل قرارگیری شکاف و طولی از شکاف که درون بستر رودخانه قرار می‌گیرد، عوامل مهم در شکاف پایه پل‌ها هستند [۹]. محل قرارگیری شکاف پایه پل می‌تواند در نزدیکی بستر رودخانه و یا نزدیک سطح آب باشد. وقتی شکاف در نزدیکی بستر واقع گردد، جریان نزدیک شونده به پایه در لایه‌های تحتانی برای عبور از شکاف شتاب گرفته و رفتاری همانند جت افقی خواهد داشت. از آنجایی که جهت افقی بر جریان رو به پایین ایجاد شده در جوار پایه عمود است باعث انحراف آن گردیده و مانع از برخورد مستقیم جت جریان به بستر می‌گردد که در نتیجه آن از توان فرسایشی جریان رو به پایین کاسته می‌شود [۸]. پس از مطالعه تأثیر شکل پایه‌ها در کاهش تنش برشی بحرانی (در مقایسه با پایه دایره‌ای ساده)، مدل پایه‌ها در ترکیب با شکاف مجاور بستر که ابعاد آن مطابق مطالعات پژوهشگران مختلف انتخاب شده، مورد بررسی قرار می‌گیرند. عرض پیشنهادی برای شکاف مستطیلی ۰/۲۵ قطر (عرض) پایه و ارتفاع آن برابر عرض پایه می‌باشد که برای عرض ۵/۱ cm عرض شکاف ۱/۲۷۵ cm و ارتفاع آن ۵/۱ cm به دست آمده است. در شکل (۹)، پایه‌های پل شکاف‌دار نشان داده شده‌اند.

۴- بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

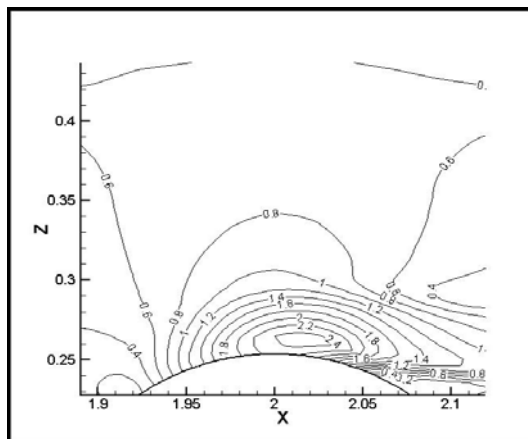
در شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) نواحی تنش‌های برشی بحرانی ($\tau/\tau_c > 1$) در اطراف پایه‌های پل با اشکال مختلف مشاهده می‌گردد. این نواحی، نواحی آغاز آبشستگی بستر کانال می‌باشند. تنش برشی بستر و τ_c تنش برشی بحرانی بستر بوده و مقدار آن مطابق آزمایشات Melville [۲۹] برابر $\tau_c = 0.1196 \text{ Pa}$ در نظر گرفته شده است. بیشینه تنش برشی بی‌بعد شده برای پایه دایره‌ای ساده مساوی ۳، برای پایه مستطیلی با دماغه نیم دایره‌ای مساوی ۲/۲، برای پایه بیضی برابر با ۲/۴ و برای پایه با مقطع عدسی مساوی ۱/۷ حاصل گردیده که این نتایج در جدول (۱) ارائه شده‌اند.



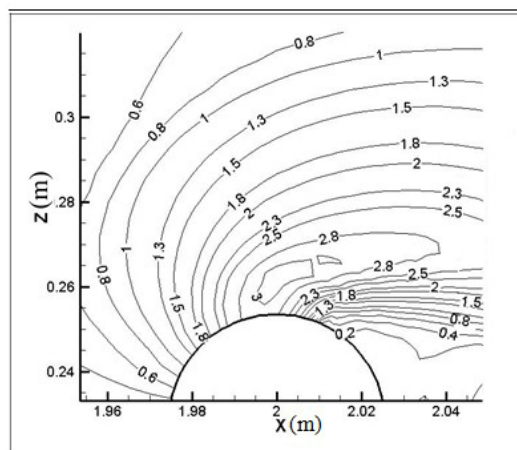
شکل ۹- پایه‌های پل شکاف‌دار



شکل ۱۰- توزیع تنش برشی بحرانی پیرامون پایه با مقطع دایره‌ای ساده

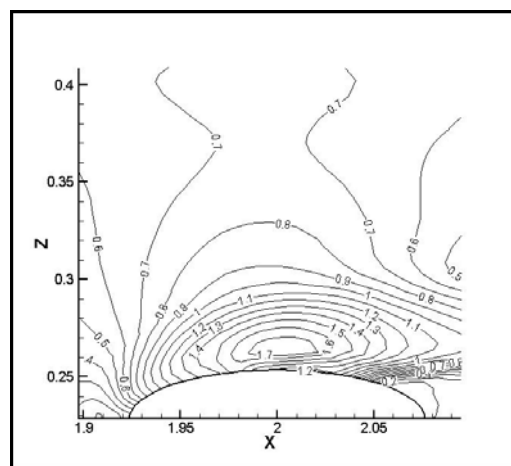


شکل ۱۳- توزیع تنش برشی بحرانی پیرامون پایه با مقطع عدسی



شکل ۱۱- توزیع تنش برشی بحرانی پیرامون پایه با مقطع مستطیلی با دماغه نیم دایره‌ای

درصد کاهش بیشینه تنش برشی بحرانی پایه مستطیلی با دماغه نیم دایره‌ای مساوی ۲۶، پایه بیضی شکل برابر ۲۰ و پایه با مقطع عدسی مساوی ۴۳ می‌باشد. لذا بیشترین درصد کاهش تنش برشی بحرانی مربوط به پایه عدسی شکل می‌باشد. یکی از عوامل مهم وقوع آتشسوزی در پیرامون پایه‌ها، جدایش جریان از مرزهای پایه و تشکیل گردابه در بالادست و پایین دست آن می‌باشد. در پایه با مقطع عدسی، الگوی جریان اطراف پایه کمتر دستخوش تغییر شده است. به عبارتی در این مدل با کاهش شدت گردابه‌های اطراف آن مقدار تنش برشی بستر کاهش یافته و احتمال وقوع فرسایش بستر نیز کمتر می‌گردد. در ادامه شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) نشان دهنده توزیع تنش‌های برشی بحرانی پیرامون پایه‌های شکاف‌دار با چهار مقطع مختلف می‌باشند. نتایج به دست آمده به صورت خلاصه در جدول (۲) ارائه گردیده‌اند.



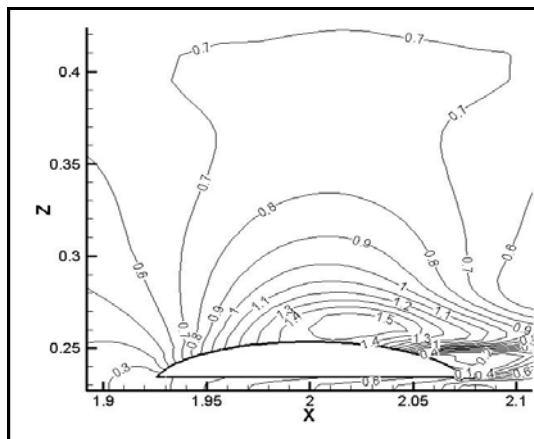
شکل ۱۲- توزیع تنش برشی بحرانی پیرامون پایه با مقطع بیضی

جدول ۱- تأثیر شکل پایه در کاهش بیشینه تنش برشی بحرانی

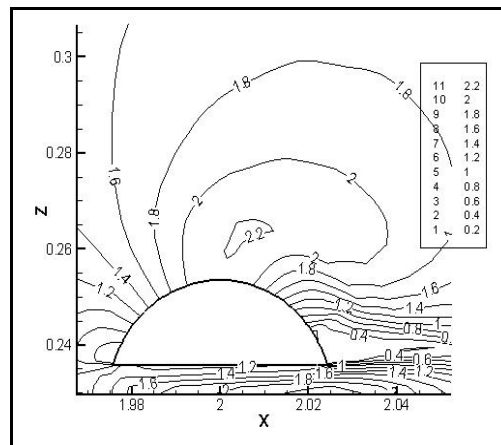
شکل پایه	دایره	مستطیلی با دماغه نیم دایره‌ای	بیضی	عدسی
بیشینه تنش برشی بحرانی	۳	۲/۲	۲/۴	۱/۷
درصد کاهش تنش برشی نسبت به پایه دایره‌ای	—	۲۶	۲۰	۴۳

جدول ۲- تأثیر شکاف پایه در کاهش بیشینه تنش برشی

شکل پایه	دایره	مستطیلی با دماغه نیم دایره‌ای	بیضی	عدسی
بیشینه تنش برشی بحرانی پایه بدون شکاف (Pa)	۳	۲/۲	۲/۴	۱/۷
بیشینه تنش برشی بحرانی پایه شکاف‌دار (Pa)	۲/۲	۱/۶	۲	۱/۵
درصد کاهش تنش برشی پایه شکاف‌دار نسبت به پایه بدون شکاف (درصد)	۲۶	۲۷	۱۶	۱۲



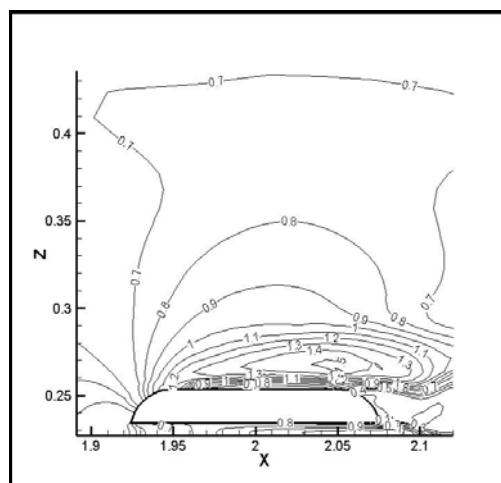
شکل ۱۷- توزیع تنش برشی بحرانی پیرامون پایه با مقطع عدسی شکافدار



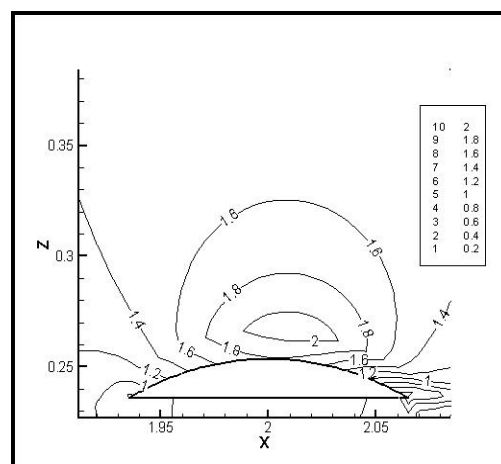
شکل ۱۴- توزیع تنش برشی بحرانی پیرامون پایه دایره‌ای شکافدار

بیشینه تنش برشی بحرانی بی‌بعد شده برای پایه دایره‌ای شکافدار مساوی $2/2$ می‌باشد که نسبت به پایه دایره‌ای ساده، کاهشی در حدود ۲۶ درصد از خود نشان می‌دهد. برای پایه مستطیلی با دماغه نیم دایره‌ای، درصد کاهش تنش برشی نسبت به پایه بدون شکاف مساوی ۲۷ درصد، برای پایه عدسی شکل حدود ۱۲ درصد و برای پایه با مقطع بیضی برابر با ۱۶ درصد می‌باشد. لذا ماکزیمم تأثیر شکاف در کاهش تنش برشی بحرانی مساوی ۲۷ درصد بوده که در پایه مستطیلی با دماغه نیم‌دایره‌ای مشاهده می‌گردد. جدول (۳) جمع‌بندی نتایج را برای مدل‌های ترکیبی نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد پایه عدسی شکافدار بیشینه درصد کاهش تنش برشی بحرانی را نسبت به پایه دایره‌ای ساده داشته که مقدار آن مساوی ۵۰ درصد است. در این مدل ترکیبی، مؤثرترین پارامتر در کاهش تنش برشی، مقطع هندسی پایه می‌باشد که میزان آن ۴۳ درصد و نقش حفاظتی شکاف تنها ۱۲ درصد بوده است. در این شکل پایه، انحنای مقطع تا حدود بسیار زیادی مانع از جدایش جریان از مرزهای پایه می‌گردد و استفاده از شکاف چون موجب تغییر شکل پایه می‌گردد، تأثیر قابل توجهی در کاهش آبشستگی نخواهد داشت. در پایه مستطیلی با دماغه نیم دایره‌ای، با توجه به این که انحنای مقطع کم بوده و ممانعت در برابر جریان زیاد می‌باشد، شکل پایه نقش مطلوبی در کاهش تنش برشی بستر نداشته؛ لیکن استفاده از شکاف به طور مؤثری موجب کاهش عرض انسداد شده و ممانعت در برابر جریان کمتر می‌گردد. لذا تأثیر استفاده از شکاف در پایه‌های نوک پهن در مقایسه با پایه‌های نوک تیز قابل ملاحظه می‌باشد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت ترکیب ابزارهای مختلف کاهنده عمق آبشستگی، ترکیب غیر خطی نتایج حاصله را موجب می‌گردد.



شکل ۱۵- توزیع تنش برشی بحرانی پیرامون پایه مستطیلی با دماغه نیم‌دایره‌ای شکافدار



شکل ۱۶- توزیع تنش برشی بحرانی پیرامون پایه بیضی شکل شکافدار

جدول ۳- تأثیر مدل ترکیبی پایه‌ها در کاهش بیشینه تنش برشی بحرانی

تنش برشی					شکل پایه
بدون شکاف	شکاف‌دار	درصد کاهش پایه بدون شکاف	درصد کاهش پایه شکاف‌دار	درصد کاهش پایه شکاف‌دار نسبت به پایه ساده دایره‌ای	
۳	۲/۲	-----	۲۶	۲۶	دایره
۲/۲	۱/۶	۲۶	۲۷	۴۶	مستطیلی با دماغه نیم دایره‌ای
۱/۷	۱/۵	۴۳	۱۲	۵۰	عدسی
۲/۴	۲	۲۰	۱۶	۳۳	بیضی

۶- نتیجه‌گیری

به منظور انتخاب مدل آشفتگی مناسب، ناحیه گسترده‌تری تنش‌های برشی آغاز کننده آبشستگی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته و با مقایسه نتایج با نتایج تجربی و عددی موجود، مدل آشفتگی RSM انتخاب گردید. مدل‌سازی‌های انجام گرفته تأثیر مثبت مقطع هندسی عدسی در کاهش میزان تنش‌های برشی بحرانی و نیز کوچک‌تر شدن این نواحی ($\tau/\tau_c \geq 1$) را نشان دادند. میزان درصد کاهش تنش برشی بستر در این مقطع برابر ۴۳ درصد نسبت به پایه دایره‌ای ساده می‌باشد. شکاف نیز نقش حفاظتی مؤثری در کاهش تنش‌های برشی بستر داشته و در تمامی مقاطع موجب کاهش مقدار آن گردیده است؛ لیکن کارایی شکاف در پایه با مقطع مستطیلی با دماغه نیم دایره‌ای بیشتر از سایر مقاطع بوده و میزان تأثیر آن ۲۷ درصد می‌باشد. با این وجود، مدل ترکیبی مقطع عدسی با شکاف، کارایی مطلوب خود را حفظ نموده و با کاهش ۵۰٪ نسبت به پایه دایره‌ای بدون شکاف، بیشینه تأثیر را در کاهش تنش برشی بحرانی بستر دارد.

۶- مراجع

- [5] Melville, B. W., Coleman, S. E., "Bridge Scour", Water Resources Publication LLC, Highlands Ranch, Colorado, USA, 2000.
- [6] Dargahi, B., "Controlling Mechanism of Local Scouring", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116 (10), 1197-1214.
- [۷] محمدی، ر.، "بررسی پدیده آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های استوانه‌ای شکل تحت جریان‌های ماندگار با استفاده از مدل فیزیکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۵.
- [8] Chiew, Y. M., "Scour Protection at Bridge Piers", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 118 (9), 1260-1269.
- [9] Kumar, V., Rang Raju, K. G., Vittal, N., "Reduction of Local Scour around Bridge piers Using Slot and Collars", ACSE, Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125 (12), 1302-1305.
- [10] El-Razek, M. A., El-Motaleb, M. A., Bayoumy, M., "Scour Reduction around Bridge Piers Using Internal Opening through the Pier", Journal of Alexandria Engineering, 2003, 42 (2), 241-248.
- [۱۱] نادری بنی، م.، "کنترل و کاهش آبشستگی موضعی در پایه‌های پل با استفاده از شکاف"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۰.
- [۱۲] آقاخانی افشار، ح.، "بررسی اثر هندسه شکاف پایه پل و پایه‌های مجاور بر کاهش آبشستگی موضعی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۹.
- [۱۳] حیدرپور، م.، افضلی‌مهر، ح.، خداحمی، ز.، "حفاظت گروه پایه‌های استوانه‌ای پل در برابر آبشستگی موضعی با استفاده از شکاف"، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳۸۶، ۴ (۳)، ۱۷۴-۱۸۵.
- [14] Christensen, Z. M., "Reduction of Local Scour around Bridge Piers: Combined System of Aerofoil and Slot", BS Thesis,
- [1] Drysdale, D. M., "The Effectiveness of an Aerofoil Shaped Pier in Reducing Down Stream Vortices and Turbulence", University of Southern Queensland, 2008.
- [2] Laursen, E. M., Toch, A., "Scour Around Bridge Piers and Abutments", Iowa Highway Research Board Bulletin, No. 4, Bureau of Public Roads, Iowa, 1956.
- [3] Dey, S., Bose, S. K., Sastry, G. L. N., "Clear-Water Scour at Circular Piers: A Model", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121 (12), 869-876.
- [4] Breusers, H. N. C., Nicollet, G., Shen, H. W., "Local Scour around Cylindrical Piers", Journal of Hydraulic Research, 1977, 15 (3), 211-252

- [۲۳] عیاری، ش.، "بررسی اشکال پایه پل بر الگوی جریان اطراف آن با استفاده از نرم افزار فلوئنت"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۶.
- [۲۴] نوری فر، م.، "بررسی اثر شکاف پایه پل بر کاهش عوامل آبستگي موضعی به کمک نرم افزار Fluent"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۹.
- [25] Esmaili, T., Dehghani, A. A., Pirestani, M. R., Sumi, T., "Numerical Simulation of Skewed Slot Effect on Local Scour Reduction", Journal of Water Science Research, 2011, 3, 201-213.
- [۲۷] چناری، س. ع.، ملکی، ح.، "بررسی عددی اثر پایه پل شکافدار و بدون شکاف بر میزان تنش برشی کف و توزیع سرعت جریان"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ارومیه، ۱۸-۱۵ آبان ماه، ۱۳۹۱.
- [27] Salaheldin, T. M., Imran, J., Chaudhry, H. "Numerical Modeling of Three-Dimensional Flow Field around Circular Piers", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, ACSE, 2004, 130 (2), 91-99.
- [28] Anonymous, "FLUENT User's Guide", Fluent Incorporated, USA, 2006.
- [29] Launder, B. E., Spalding, D. B., "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Journal of Computational Methods in Applied Mechanical Engineering, 1974, 3, 269-289.
- [30] Melville, B. W., "Local Scour at Bridge Sites", Report No. 117, Department of Civil Engineering, School of Engrg., University of Auckland, Auckland, New Zealand, 1975.
- Department of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, 2009.
- [15] Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F., Cardoso, A., "Countermeasures Against Local Scouring at Bridge Piers: Slot and Combined System of Slot and Bed Sill", Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135 (5), 425-431.
- [16] Haji Mashhadi, S., Musavi Jahromi, H., Sanei, M., Shafai Bajestan, M., "Evaluation of Rectangular Slot to Control of Time Development of Local Scour around Cylindrical Bridge Pier", Journal of Ecology, Environment and Conservation, 2012, 18 (13), 489-496.
- [۱۷] خدابخشی، ع.، صانعی، م.، کلاهی، ع. ع.، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر ارتفاع شکاف از سطح بستر رودخانه بر آبستگي موضعی پایه پل"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ارومیه، ۱۸-۱۵ آبان ماه، ۱۳۹۱.
- [18] Hassanzadeh, Y., Hakimzadeh, H., Kardan, N., Ayyari, Sh., "Comparing the Flow Pattern Around the Oval Shape Pier with and without Slot Using Fluent Software", 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan, Iran, 8-10 May, 2012.
- [19] Ettema, R., "Scour at Bridge Piers", PhD Thesis, Auckland University, Auckland, New Zealand, 1980.
- [20] Yang, Q., "Numerical Investigations of Scale Effects on Local Scour around a Bridge Pier", MSc Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering University of Florida State, Florida, 2005.
- [۲۱] بشارتی، ح.، "بررسی سه بعدی جریان اطراف پایه مخروطی با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ "، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، ۱۳۸۷.
- [۲۲] پوراحمدی، م.، "بررسی تجربی و عددی پدیده آبستگي موضعی در اطراف پایه های مخروطی و هرمی شکل"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، ۱۳۸۹.

EXTENDED ABSTRACT

3D Numerical Studying into Combined Models of Pier Shape and Slot in Reducing the Bed Shear Stresses Starter of Scouring around the Bridge Pier

Yousef Hassanzadeh ^{a,*}, Nazila Kardan ^a, Habib Hakimzadeh ^b

^a Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz 513351996, Iran

Received: 29 December 2013; **Accepted:** 22 June 2013

Keywords:

Scouring, Cross section of pier, Slot, Fluent, Turbulence models

1. Introduction

When a structure is placed on an erodible bed, it causes an increase in local sediment transport capacity and consequently this leads to scour in the vicinity of the structure. This is referred to as local scour in the literature. Local scour has been identified as one of the key factors that cause failure of structures in the bridges, jetties and offshore platforms. The complexities of bridge scour mechanism have caused the scour to be one of the most active topics in civil engineering researches. Numerous studies have been reported on local scour around bridge piers in steady currents in the last decades. A majority of these studies deal with laboratory model studies. A brief literature review can reveal the importance of this subject. Several methods have been proposed by researchers to control the scour around the bridge piers. These methods can be divided into two main categories: the first one is the armoring method or increasing the resistance of the bed material around the pier as rip rap, and the second one is altering of the flow pattern around the pier.

2. Methodology

It has been shown that one of the important parameters affecting the scour depth is the shape of the piers. The development of local scour is caused by the streamline contraction at the two sides of the cylinder, the horseshoe vortex in front of the cylinder and the vortex shedding flow in the wake of the cylinder. Therefore, the cross-section of a bridge pier can considerably affect the flow pattern around it and formation of the mentioned vortices. Thus, design of cross-sections for piers in order to produce the least disturbance in the flow pattern around the pier is a significant concern from the hydro-dynamical and structural points of views. So far, the efficiency of the different cross-sections was tested by a number of researchers [1]. Then, regarding to the published results, 4 cross-sections (including the reference cross-section) having low shape factors (i.e., circular, round-nosed rectangular, elliptical and lenticular) were selected and retested here. For this study, three-dimensional numerical simulations of the flow around the piers with the mentioned cross sections with and without slot were carried out using the Fluent software. Then, the effects of each pier model on the surrounding flow and maximum bed shear stress were investigated numerically.

The Melville's experimental and Salaheldin's numerical data were selected for the verification purpose of numerical model results. A channel with 6m length, 0.456m width and a high of 0.225m with the circular pier of 5.1cm diameter located at 2m distance from the entrance of channel was considered for the numerical tests. This was in a way that the flow was developed before it gets to the pier. The flow velocity was 0.25m/s at the inlet. A weir of 8.5cm height was considered at the end of channel to provide the depth of 15cm flow [2]. The width of slots was chosen to be a quarter of the diameter (width) of the piers and their lengths were chosen to be twice of the pier width, and in all cases the slot was in the vicinity of the bed [3]. In order to perform numerical simulations using the Fluent Software, the computational domain was firstly meshed using the preprocessing Gambit software.

* Corresponding Author

E-mail addresses: yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir (Yousef Hassanzadeh), n_kardan2000@yahoo.com (Nazila Kardan), hakimzadeh@sut.ac.ir (Habib Hakimzadeh).

3. Results and discussion

3.1. Turbulence models

The important point in the numerical simulations of turbulent flows is to apply the turbulence effect of flow for which the turbulence models are being used. There are different turbulence models in the Fluent which simulate in turns the turbulence effects. Each model, depending on the type and condition of the modeled area and desired accuracy, has its own advantages. The bed shear stress distribution around the pier was evaluated using the $k-\varepsilon$ and RSM turbulence models. The RSM model was then found to reproduce more accurate numerical results when compared with experimental data. Fig. 1 shows the distribution of bed shear stresses simulated by RSM turbulence model.

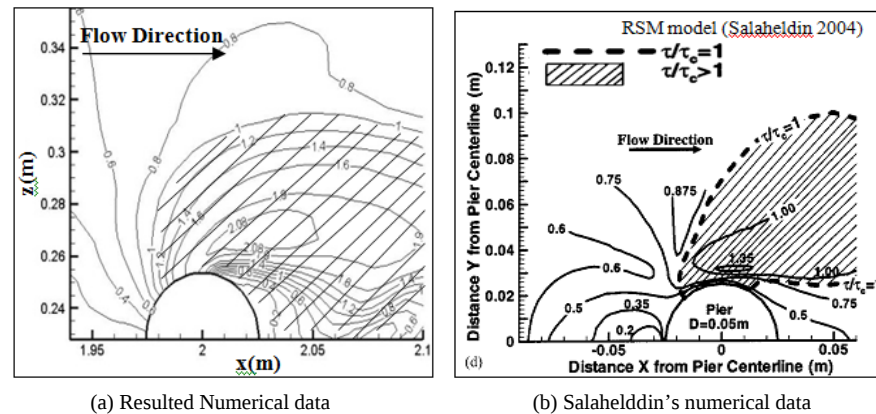


Fig. 1. Distribution of bed shear stresses simulated by RSM turbulence model

3.2. Cross-section of piers

The dimensionless maximum bed shear stress for the circular pier was 3, for the round-nosed rectangular pier was 2.2, for elliptical pier was 2.4 and finally was 1.7 for pier with lenticular cross-section. The stresses have been dimensionless by the critical bed shear stress (i.e., 0.196 Pa for this test case). Then, the bed shear stress reductions were 26%, 20% and 43% for the round-nosed rectangular, elliptical and lenticular cross-sections, respectively in comparison with that of the reference pier (i.e., circular pier). As it is noticed, the lenticular cross-section mainly acts much better than the other profiles and this cross-section may consequently cause minimum scour depth among them.

For the slotted circular pier, the dimensionless maximum shear stress became 2.2 which decreased 26% with respect to the reference pier. For the pier with round-nosed rectangular cross-section, the non-dimensional maximum shear stress reached to 1.6 which had 27% reduction in comparison with that of no slotted one. These reductions equal 12% and 16% for the lenticular and elliptical cross-sections, respectively. So, it can be concluded that the slot also has an effective protection role in decreasing the bed shear stresses and reduce their magnitudes in all the cases. However, its efficiency for the round-nosed rectangular pier is more than the other cross sections. Nevertheless, the combined model of lenticular section with slot has maintained its favorable efficiency and has the maximum effect on decreasing the critical bed shear stress by 50 percent in comparison with the reference pier (i.e., circular pier without slot). The results are presented in Table 1.

Table 1. Reduction of critical bed shear stress in combined model piers

Cross-section	Bed shear stress				
	Without slot	Slotted model	Reduction of bed shear stress in comparison with that of the reference pier	Reduction of bed shear stress in slotted models in comparison with that of the models without slot	Reduction of bed shear stress in slotted models in comparison with that of the reference pier
Circle	3	2.2	---	26	26
Round-nosed rectangular	2.2	1.6	26	27	46
Lenticular	1.7	1.5	43	12	50
Elliptical	2.4	2	20	16	33

4. Conclusions

To investigate the turbulence models, $k-\varepsilon$ RNG and RSM were selected and the distribution of bed shear stresses around the models was numerically evaluated. The RSM model was then found to reproduce more accurate numerical results when compared with experimental data. Three models with different cross-sections (i.e. round-nosed rectangular, lenticular and elliptical) were evaluated by comparing the maximum bed shear stress around them. The results showed that the lenticular cross-section mainly acts much better than the other profiles and this cross-section may consequently cause minimum scour depth among them. In this model, the reduction of bed shear stress was 43% regarding to the reference model. In slotted circular pier, the dimensionless maximum shear stress decreased 26% with respect to the reference pier. For the pier with round-nosed rectangular cross-section, this reduction was 27% in comparison with that of no slotted one. These reductions equal 12% and 16% for the lenticular and elliptical cross-sections, respectively. So, it can be concluded that the slot also has an effective protective role in decreasing the bed shear stresses and reducing their magnitudes in all the cases. However, its efficiency for the round-nosed rectangular pier is more than the other cross sections.

5. References

- [1] Drysdale, D. M., "The Effectiveness of an Aerofoil Shaped Pier in Reducing Down Stream Vortices and Turbulence", University of Southern Queensland, 2008.
- [2] Salaheldin, T. M., Imran, J., Chaudhry, H., "Numerical Modeling of Three-Dimensional Flow Field around Circular Piers", ACSE Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130 (2), 91-99.
- [3] Kumar, V., Rang Raju, K. G., Vittal, N., "Reduction of Local Scour around Bridge piers Using Slot & Collars", ACSE Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125 (12), 1302-1305.
- [4] Melville, B. W., "Local Scour at Bridge Sites", Report No. 117, Department of Civil Engineering, School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 1975.