

مدلسازی عددی سه بعدی جریان در مقطع مرکب نامتقارن در محل پل رودخانه‌ای (مطالعه موردی: پل خورش رستم در خلخال)

مقاله علمی - پژوهشی

امیر محجوب*، استادیار، پژوهشگر حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
خیراله خادمی، استادیار، پژوهشگر حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.mahjoob@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱

صفحه ۵۲۶-۵۱۳

چکیده

پل‌های رودخانه‌ای از آسیب پذیرترین ابنیه فنی راه و راه آهن در مقابل خطر سیلاب هستند. در این میان مشخصات رودخانه در سیلابی که به وقوع می‌پیوندد و آسیبی که می‌تواند بر سازه پل ایجاد کند، موثر است. یکی از مقاطع عرضی معمول، که خصوصاً در رودخانه‌ها و مسیل‌های طبیعی مشاهده می‌شود، مقطع مرکب می‌باشند. مقطع مرکب نامتقارن یکی از انواع مقاطع مرکب هستند که سبب می‌شود شرایط جریان در محل پل‌ها با پیچیدگی‌هایی همراه باشد. در این پژوهش با شبیه‌سازی عددی سه بعدی جریان در محل پل، ابعاد مختلف مساله از لحاظ هیدرولیکی بررسی گردیده است. در این راستا از نرم‌افزار *FLOW-3D* استفاده شده است. پس از معرفی اجمالی نرم‌افزار و بیان نحوه محاسبه پارامترهای مهم هیدرولیکی از جمله انرژی جنبشی، اتلاف انرژی و تنش برشی در نرم‌افزار، جهت اطمینان از عملکرد مناسب نرم‌افزار مذکور، صحت سنجی نتایج با یک مدل آزمایشگاهی صورت پذیرفته است. از مدل جهت شبیه‌سازی جریان در محل پل خورش رستم خلخال استفاده گردید. پل مذکور در یک تنگ‌شدگی دهانه رودخانه با مقطع عرضی مرکب نامتقارن با دیوار هدایت بیضوی واقع شده است. نتایج مدلسازی نشان داد که اگرچه استفاده از دیوار هدایت آب بیضوی در ساحل سمت راست سبب محافظت کوله پل در برابر ایجاد تغییرات شدید سرعت و تنش برشی شده است اما شکل هندسی مقطع رودخانه در محل پل سبب توزیع غیریکنواخت جریان در محل پایه‌های پل می‌گردد. بطوریکه تنش برشی در اطراف پایه‌ها که عامل اصلی آبشستگی بوده و می‌تواند سبب تخریب پل گردد، تا حدود ۵۰ درصد متغییر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی، پل رودخانه‌ای، نرم‌افزار *FLOW-3D*، مقطع مرکب نامتقارن، شبیه‌سازی سه‌بعدی

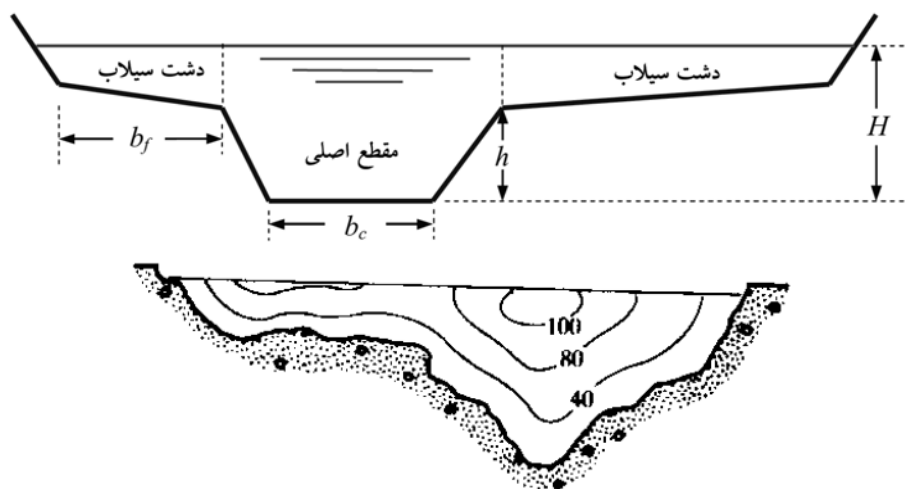
۱- مقدمه

مقطع مرکب اطلاق می‌شود. بدیهی است که به علت وضعیت هندسی مقاطع مرکب، شرایط جریان نیز در چنین مقاطعی نسبت به مقاطع معمولی پیچیده‌تر خواهد بود. بنابراین بررسی رفتار جریان در کانال‌های مرکب خصوصاً زمانی که اندرکنش بین سازه و جریان وجود داشته باشد، به علت پیچیدگی‌های خاص آن‌ها از دیرباز مورد توجه محققین هیدرولیک بوده است. همچنین این مقاطع مرکب از نظر هندسی و هیدرولیکی نیز دارای تنوع هستند.

موقعیت کشور ایران و گستردگی آن باعث شده، کشور مستعد وقوع بلاای طبیعی از جمله سیلاب باشد که در حوزه حمل و نقل سالانه به زیرساخت‌ها از جمله پل‌ها و شریان‌های حیاتی، خسارات فراوانی وارد می‌کند. بمنظور احداث راه‌های ارتباطی، ناگزیر از کنار رودخانه‌ها و گاها از روی رودخانه‌ها عبور خواهد شد. در برخی موارد مقطع رودخانه، عرضی بوده و از یک مجرای اصلی و یک یا دو سیلاب‌دشت تشکیل شده است. به چنین مقاطعی،

دیفرانسیل جزیی حاکم بر جریان سیالات، می‌تواند نه تنها در رسیدن به پاسخ‌های مناسب کمک کند بلکه به لحاظ اقتصادی نسبت به بقیه روش‌ها مانند ساخت مدل‌های فیزیکی و برداشت‌های میدانی، به صرفه‌تر باشد. با توجه به مطالب فوق محققین مختلفی بررسی شرایط جریان در مقاطع مرکب با یا بدون پل مستقر بر آن را موضوع تحقیق خود قرار داده‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد.

یکی از این موارد مقاطع مرکب نامتقارن است که نمونه‌ای از آن در شکل (۱) نشان داده شده است. جریان خصوصاً در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت، به صورت کاملاً سه‌بعدی است (دانکو و همکاران، ۱۴۰۲). در مواردیکه نیاز به احداث سازه‌ای مانند پل بر چنین مقطعی ضروری باشد، لازم است تا بررسی‌های هیدرولیکی دقیقی از جریان صورت پذیرد که بتوان به شناخت درست‌تری از پارامترهایی مانند تراز سطح آزاد آب، سرعت‌های عرضی، میزان آبستنگی و ... دست یافت. با توجه به دانش فنی موجود بشر، استفاده از روش‌های عددی در حل معادلات



شکل ۱. مقاطع مرکب غیرمتقارن با یک یا دو سیلاب‌دشت

توزیع سرعت در کانال دچار تغییر شده و با افزایش این نسبت محل سرعت بیشینه به سطح آزاد و همچنین به محل تقاطع کانال اصلی و دشت‌سیلابی نزدیک می‌شود. هرچه ارتفاع زبری بستر پهنه سیلابی افزایش یابد سرعت در منطقه پهنه سیلابی کاهش می‌یابد و منحنی‌های هم‌سرعت به سمت مقطع اصلی متمایل می‌شوند. با افزایش زبری بستر پهنه سیلابی در منحنی‌های هم‌سرعت مقطع اصلی به جز در منطقه نزدیک پهنه سیلابی تغییرات محسوسی دیده نمی‌شود و محل سرعت بیشینه ثابت است و زبری پهنه سیلابی تاثیر زیادی بر پروفیل عمودی سرعت در محل بیشینه سرعت ندارد (رحیمی و رحیم‌پور، ۱۳۹۵). صفایی و همکارانش مدلسازی عددی جهت تعیین تاثیر طول کوله پل در سیلاب‌دشت بر تنش برشی بستر و مومنتوم جریان را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان با استفاده از تحلیل عددی سه‌بعدی به بررسی تنش برشی بستر و اختلاف مومنتوم بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی در یک کانال مرکب دوزنقه‌ای متقارن با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D

حمیدی و همکارش به بررسی توزیع عرضی و عمقی سرعت به کمک مدل Flow-3D در یک آبراهه مرکب نامتقارن پرداختند. از شرط مرزی تقارن برای دیواره‌های جانبی و کف کانال، عمق جریان مشخص به‌عنوان شرط مرزی بالادست و جریان خروجی به‌عنوان شرط مرزی پایین‌دست استفاده شد. برای شبیه‌سازی جریان به صورت آشفتنه از مدل گردابه‌های بزرگ استفاده گردید. نتایج نشان داد که مولفه‌های سرعت در هر دو راستای عرضی و عمقی دارای تغییرات زیادی است. همچنین با استفاده از سه مقدار زبری برای جدار کانال، پروفیل سرعت در وسط کانال اصلی بررسی شده و در هر حالت، تفاوت‌ها مورد بحث قرار گرفت (حمیدی و امید، ۱۳۹۱). در پژوهش دیگری با استفاده از نرم‌افزار فلونت تاثیر نسبت عمق آب دشت‌سیلابی به عمق آب در کانال اصلی و زبری پهنه‌سیلابی بر توزیع سرعت و محل سرعت بیشینه در کانال روباز با مقطع مرکب بررسی شده است. نتایج نشان داد با تغییر نسبت عمق آب دشت‌سیلابی به عمق آب در کانال اصلی،

نسبت به کانال مرکب متقارن دارند. همچنین برای کانال‌های مرکب نامتقارن، لایه برشی تمایل دارد به یک جریان عرضی قوی‌تر تغییر شکل دهد تا کانالی با عرض سیلاب‌دشت جدید ایجاد کند. اندازه و زبری دشت‌های سیلابی به شدت بر عرض لایه برشی کانال اصلی تأثیر می‌گذارد (Singh et. al., 2023).

همانطور که از مرور ادبیات فنی استنباط می‌شود مساله کانال مرکب و تأثیر سازه پل بر جریان در کانال‌های مذکور، مورد علاقه محققین مختلف قرار داشته است اما شبیه‌سازی عددی سه بعدی جریان در رودخانه با مقطع مرکب نامتقارن در محل پل و شرایط واقعی، کمتر مورد توجه بوده است. در این پژوهش از نرم افزار FLOW-3D برای مدلسازی جریان استفاده شده است. در ادامه ضمن معرفی قسمت‌هایی از نرم‌افزار که به پژوهش حاضر مرتبط است، صحت سنجی عملکرد نرم‌افزار ارائه خواهد شد. سپس شبیه‌سازی جریان در محل پل خورش رستم در بر روی رودخانه قزل اوزن صورت پذیرفته و نتایج آن ارائه می‌گردد.

۲- نرم افزار FLOW-3D

نرم‌افزار Flow-3D قابلیت مدل‌سازی در فضای سه‌بعدی را دارا می‌باشد و بر اساس قوانین بنیادی بقای جرم، مومنتم و انرژی پایه‌گذاری شده است. این نرم‌افزار از یک شبکه متشکل از سلول‌های مستطیلی استفاده می‌کند که دارای مزایای بسیاری برای تولید آسان است و نظم مناسب آن، شبیه‌سازی عددی را بهبود می‌بخشد و نیاز به ذخیره حافظه را کاهش می‌دهد. معادلات پایه‌ای مورد استفاده در این مدل، معادلات ناویر استوکس هستند. معادله (۱) معادله پیوستگی و معادلات (۲) تا (۴) معادلات بقای اندازه حرکت برای سیال تراکم‌پذیر هستند (Schlichting, 1968).

در این نرم افزار معادلات حاکم بر سیال با استفاده از روش حجم محدود حل می‌شود و محیط محاسباتی به شبکه ای با سلول‌های مربعی ثابت تقسیم می‌شود. در این نرم افزار قابلیت ریز کردن شبکه محاسباتی و همچنین تعریف بلوک‌های متعدد محاسباتی وجود دارد. بجز سرعت که در مرکز وجوه سلول‌ها در نظر گرفته می‌شود، همه متغیرها در مرکز سلول قرار دارند. این مدل قادر به مدلسازی رسوب و آلودگی به صورت سه بعدی و با در نظر گرفتن تغییرات زمانی بستر را دارد.

پرداختند. نتایج نشان داد که تنش برشی بستر در حالت با دیوار هدایت بیضوی شکل نسبت به حالت بدون دیوار هدایت، در کانال اصلی افزایش و در سیلاب‌دشت کاهش یافته است. همچنین در حالت تکیه‌گاه با دیوار هدایت بیضوی، تنش برشی بستر در سیلاب‌دشت کاهش می‌یابد که باعث بهبود شرایط در محل تکیه‌گاه پل می‌گردد ولی افزایش تنش برشی در کانال اصلی باعث می‌شود که شرایط پایه‌هایی که در کانال اصلی قرار می‌گیرند بحرانی‌تر گردد. همچنین در حالت تکیه‌گاه با دیوار هدایت بیضوی شکل اختلاف مومنتوم بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی نسبت به حالت تکیه‌گاه بدون دیوار هدایت افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش تنش برشی و ایجاد گردابه‌ها در فصل مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت می‌گردد (صفایی و همکاران، ۱۳۹۹). اردوران و همکاران با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، به ارزیابی عملکرد دینامیک سیالات محاسباتی در پیش‌بینی پروفیل تراز سطح آب در محل پل‌های بیه‌دار واقع در کانال مرکب پرداختند. نمونه‌های مطالعه شده، پل یک‌دهانه با بازشدگی نیم‌دایره، پل دودخانه با بازشدگی نیم‌دایره، پل یک‌دهانه با بازشدگی نیم‌بیضی و پل یک‌دهانه با بازشدگی مستطیل به‌همراه پایه در زوایای بیه ۳۰ و ۴۵ درجه بوده است. از مدل آشفتگی دومعادله‌ای استاندارد $k-\epsilon$ جهت برآورد حرکت گردابه‌ای آشفتگی استفاده شد. از اهداف این مطالعه برآورد قابلیت مدل FLOW-3D جهت ارزیابی جریان در محل پل با هندسه‌های مختلف و برآورد مناسب از فرآب بود. (Erduran et. al., 2012). سینق و همکارانش وضعیت جریان در کانال‌های مرکب با دو سیلاب‌دشت متمایز و مختلف از نظر عرض را بررسی کردند. درک فرآیندهای تبادل عرضی جرم و مومنتوم در مقاطع کانال مرکب با عرض‌های دشت سیلابی مختلف ضروری است زیرا این اثرات مستقیماً با پایداری ساحل رودخانه، رسوب گذاری و فرسایش مرتبط هستند. جریان‌های عرضی، انتقال مومنتوم، و آشفتگی لایه برشی بر روی دشت‌های سیلابی با اندازه‌های مختلف در کانال‌های باز مرکب مورد مطالعه قرار گرفتند. ساختارهای جریان سه‌بعدی بر روی دشت‌های سیلابی با اندازه‌های مختلف در کانال‌های مرکب بررسی شد تا اثر عوامل مختلف بر تبادل عرضی مومنتوم آشکار شود. نتایج نشان داد که جریانات عرضی و ویسکوزیته گردابی برای کانال‌های مرکب دو دشت سیلابی نامتقارن به دلیل توزیع مومنتوم بالاتر، بزرگی بیشتری

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \rho f_c v - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = \rho f_c u - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (4)$$

مسئله مورد نظر انتخاب می‌شوند که عبارت است از شرایط مرزی متقارن، دیوار، فشار، سرعت، متناوب، جریان خروجی، پیوسته، موج، دبی و شرط مرزی روی هم قرار گرفتن شبکه‌ها. از جمله این روش‌هایی که در نرم‌افزار Flow-3D از آن‌ها برای شبیه‌سازی آشفته‌گی جریان استفاده شده است، می‌توان به مدل‌های طول اختلاط پراتل، یک معادله‌ی انرژی جنبشی آشفته‌گی، دو معادله‌ی $k-\varepsilon$ مدل گروه‌های نرمال شده و مشابه‌سازی گردابه بزرگ اشاره کرد. در اینجا از روش دو معادله‌ی $k-\varepsilon$ استفاده شده است که در ادامه تشریح می‌گردد.

در مدل استاندارد $k-\varepsilon$ مقادیر انرژی جنبشی آشفته k و اتلاف آن ε توسط معادله‌های نیمه تجربی زیر بدست می‌آیند.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_{,j} = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_{,j} \right)_{,j} + G + B - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \varepsilon_{,j} = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_{,j} \right)_{,j} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G + C_1 (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} B - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

تولید انرژی جنبشی ناشی از اندرکنش بین جریان متوسط و میدان جریان آشفته می‌باشد و از همین رو به آن اصطلاحاً عبارت تولید برشی گفته می‌شود. عبارت B نیز بیانگر تولید اتلاف بویانسی ناشی از میدان چگالی نوسان کننده جریان می‌باشد. روابط صریح برای G و B به صورت زیر هستند.

در معادلات فوق، P فشار، g شتاب گرانش، f_c پارامتر کوریولیس و τ_{ij} تنش برشی در راستای j در صفحه‌ای که محور عمود بر صفحه در راستای i است، مولفه‌های سرعت u, v و w در راستاهای x, y و z محورهای مختصات بوده و ρ جرم مخصوص می‌باشد. معادلات حاکم بر حرکت سیال در این نرم‌افزار با استفاده از روش حجم محدود حل می‌شوند. یکی از قابلیت‌های مورد توجه در این نرم‌افزار، استفاده از روش حجم سیال است که امکان تخمین سطح آزاد آب را میسر ساخته است. همچنین قابلیت استفاده از روش تعریف مانع با کسر سطح-حجم، برای مدل نمودن مرزهای منحنی است و با توجه به آنکه معمولاً تغییرات پارامترها در مجاورت این نواحی زیاد است، محاسبات با دقت بیشتری صورت می‌گیرند و صحت بیشتری دارند. برای اعمال شرایط مرزی به هر سطح شبکه مش‌بندی، ده گزینه وجود دارد که با توجه به

که در آن C_1 و C_2 و C_3 ضرایب تجربی بوده و σ_k و σ_ε به ترتیب اعداد پراتل و اشمیت آشفته می‌باشند. عبارات $C_1 \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) G$ و $C_2 \rho \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right)$ در معادله (۶) به ترتیب بیانگر فرآیندهای تولید برشی ε و فرآیندهای اضمحلال ویسکوز ε می‌باشند. عبارت $C_1 (1 - C_3) \frac{\varepsilon}{k} B$ بیانگر اثرات بویانسی می‌باشد (Zhang, 1994). در معادله (۵) عبارت G بیانگر میزان

$$G = -\overline{\rho u'_i u'_j} u_{i,j} \quad (7)$$

$$B = \overline{\rho' u'_i} g_i \quad (8)$$

با قرار دادن رابطه اساسی بوزینسک در رابطه (۷)

$$G \approx \mu_t (u_{i,j} + u_{j,i}) u_{i,j} \quad (9)$$

پارامتر B را می‌توان با استفاده از تقریب ویسکوزیته ادی که در آن شار آشفته چگالی نوسان کننده بر حسب گرادیان‌های چگالی متوسط به دست می‌آید، مدل نمود.

$$B \approx -\frac{\mu_t}{\rho \sigma_p} \rho_{,i} g_i \quad (10)$$

که در آن σ_p عدد اشمیت و پراوتل جریان آشفته چگالی می‌باشند. برای جریان‌های چگالی ثابت، عبارت بویانسی با استفاده از تقریب بوزینسک به صورت زیر بدست می‌آیند.

$$B = g, \left[\frac{\mu_t}{\sigma_t} \beta_T T_{,i} + \frac{\mu_t}{S_t} \beta_C C_{,i} \right] \quad (11)$$

همانطور که پیش از این اشاره شد، $k = 0.5(\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2)$ انرژی جنبشی آشفته‌گی است که این مقدار در بستر به صورت رابطه زیر با تنش برشی بستر در ارتباط است (Biron et al., 2004).

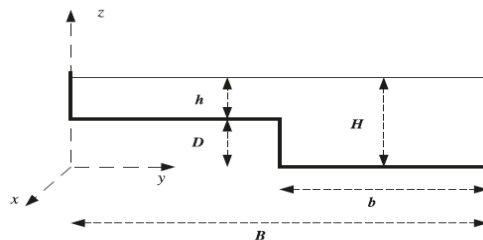
$$\tau = C \rho k \quad (12)$$

در رابطه فوق C یک ضریب تقریباً ثابت است. با توجه به ارتباط انرژی جنبشی آشفته‌گی و تنش برشی بستر (معادله ۱۲) و در نهایت نیروی اعمال شده به بستر که سبب آبشستگی و تخریب پل می‌گردد، می‌توان به اهمیت تاثیر پارامتر انرژی جنبشی آشفته‌گی پی برد.

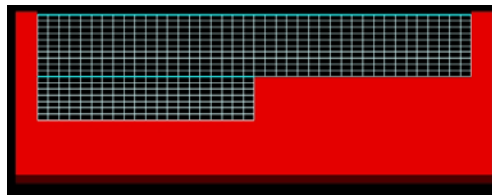
۳- اعتبار سنجی عملکرد نرم‌افزار در مقطع مرکب نامتقارن

به عرض $(B-b)$ ۲۰ سانتی‌متر وجود داشته است (شکل ۲). عمق آب در سیلاب‌دشت (h) ۴ سانتی‌متر و دبی معادل ۸۳۷۶ سانتی‌متر مکعب در ثانیه در فلومی به طول ۱۲/۵ متر با شیب ۰/۰۰۰۶۳۹۷ شبیه‌سازی شده است. شرایط مذکور در نرم‌افزار Flow3D نیز اعمال گردید. المان‌های طولی به طول ۱۰ سانتی‌متر و المان‌های عرضی به طول ۱ سانتی‌متر تعیین شد. در راستای قائم نیز ۲۰ المان در نظر گرفته شده (شکل ۳).

برای اطمینان از درستی نتایج بدست آمده در این تحقیق و قابل استناد بودن آن‌ها، نیاز است تا نتایج تحلیل نرم‌افزار با داده‌های موجود تجربی یا آزمایشگاهی مقایسه شود. بدین منظور نتایج اطلاعات آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده توسط تومیناگا و نزو مورد استفاده قرار گرفت (Tominaga and Nezu, 1991). آزمایشات با استفاده از لیزر داپلر آنومتری انجام شده است. در مدل آزمایشگاهی عرض کانال اصلی (b) ۲۰ سانتی‌متر و عمق آب (H) در آن ۸ سانتی‌متر بوده است. تنها در یک طرف سیلاب‌دشتی



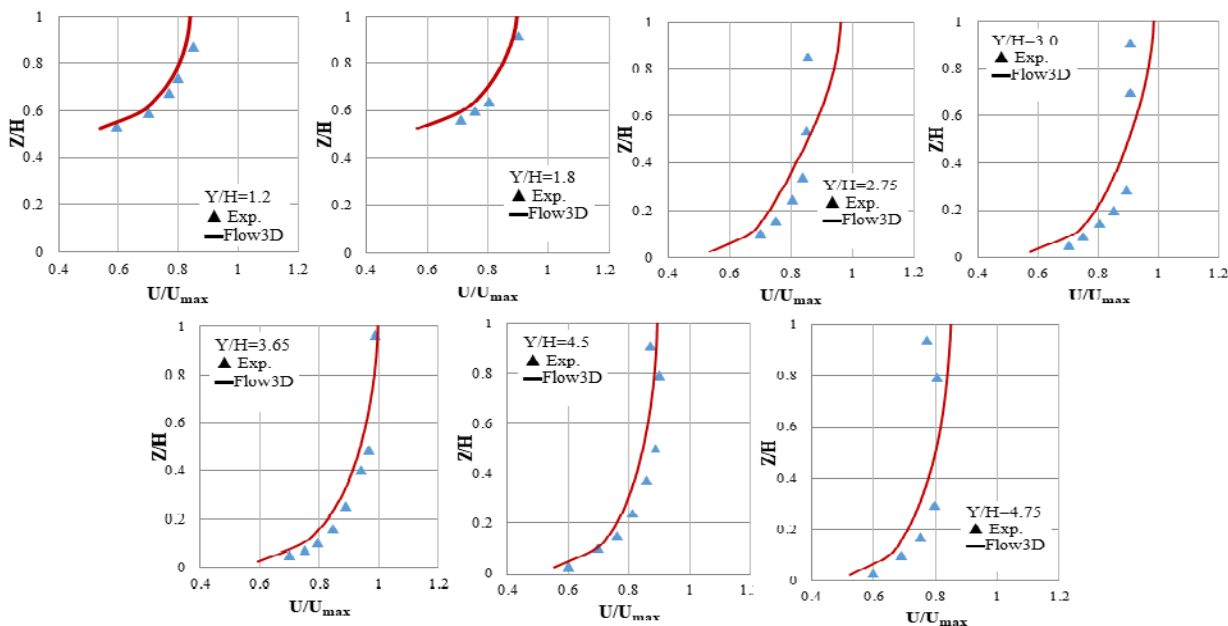
شکل ۲. شکل هندسی مقطع عرضی در مدل آزمایشگاهی تومیناگا و نزو



شکل ۳. نمایی از مقطع عرضی مدل تهیه شده در نرم افزار Flow3D

مقدار دبی و تراز سطح آب و در مرز خروجی مقدار تراز سطح آب به عنوان شرایط مرزی به مدل معرفی شد. گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه و روش حل ضمنی باقیمانده حداقل تعمیم یافته برای حل ترم فشار و ترم‌های انتقال مومنت با دقت مرتبه اول در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج توزیع سرعت طولی در راستاهای مختلف مقطع عرضی در شکل‌های (۴) نشان داده شده است.

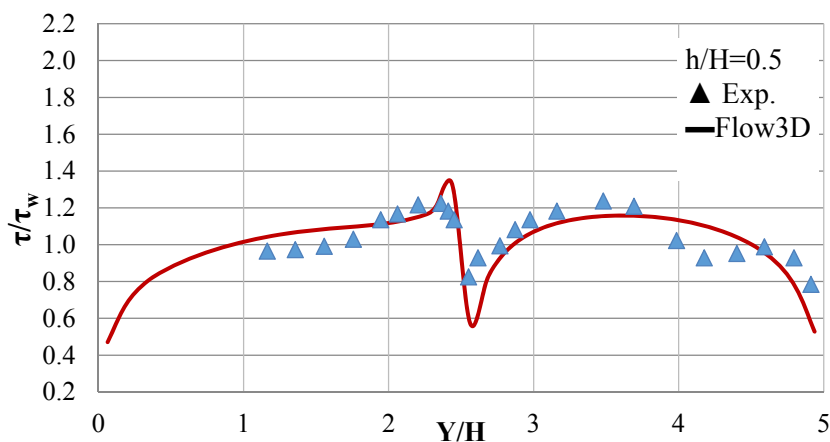
برای شبیه‌سازی بستر از المان‌های موجود در خود نرم‌افزار کمک گرفته شد. شیب آبراهه نیز با چرخش همین المان‌ها حول محور منطبق بر عرض مقطع اعمال گردید. برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ استفاده شده است. برای شرط اولیه عمق آب در تمام مقاطع ۸ سانتی‌متر فرض شد و سرعت جریان نیز در تمام المان‌ها ۳۰ سانتی‌متر بر ثانیه لحاظ گردید. در مرز ورودی



شکل ۴. مقایسه نتایج توزیع سرعت طولی در راستاهای مختلف مقطع عرضی

در این مقاطع ۹/۷، ۸/۱ و ۱۱/۶ بوده است. خطاهای مذکور می‌تواند در اثر جریانات ثانویه باشد. در بقیه مقاطع مقدار متوسط خطا زیر ۲/۵ درصد بوده است. مساله مهم دیگر در مقاطع مرکب توزیع تنش برشی در بستر است. محاسبه توزیع تنش برشی در انتقال رسوب و مطالعات آبشستگی حایز اهمیت است. نتایج توزیع تنش برشی نسبی در عرض کانال مرکب برای مطالعات آزمایشگاهی و عددی در شکل (۵) ارائه شده است. نقاط مثلثی مربوط به نتایج آزمایشگاهی و نمودار رسم شده مربوط به مدل عددی است. τ_{11} در این شکل مقدار تنش برشی متوسط است.

در شکل (۴) نمودارهای رسم شده با استفاده از خط، مربوط به تحلیل نرم‌افزاری و نمودار رسم شده با نقاط مثلثی مربوط به نتایج مدل آزمایشگاهی است. در مقطعی که $Y/H < 2/5$ باشد، مقطع در سیلاب‌دشت قرار دارد و در بقیه موارد، مقطع در کانال اصلی است. نکته قابل ذکر اینست که در مقاطع نزدیک دیواره‌ها ($Y=22$ ، $Y=24$ و $Y=38$) مقدار خطا در محاسبات عددی افزایش یافته است. مقدار متوسط خطا در مقاطع $Y=22$ ، $Y=24$ و $Y=38$ به ترتیب ۵/۳، ۷ و ۶/۷ درصد بوده و مقدار حداکثر خطا



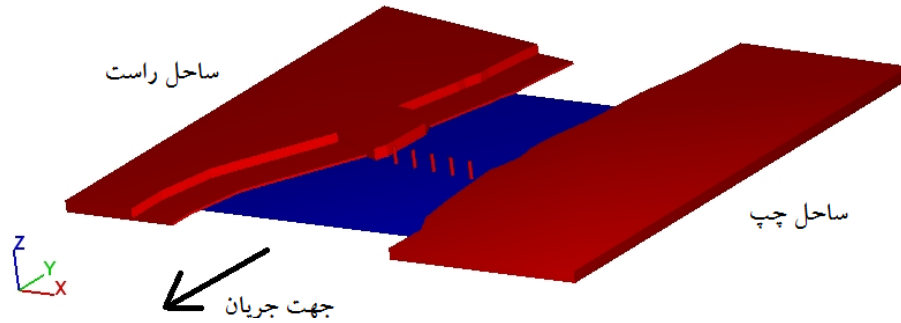
شکل ۵. توزیع تنش برشی در مقطع مرکب

بازگشت ۱۰۰ ساله برای رودخانه مورد نظر در محل پل برابر با ۱۶۵۰ مترمکعب بر ثانیه محاسبه شده است (کیلانئی و همکاران، ۱۳۹۲). مقطع رودخانه در محل پل به صورت مقطع مرکب نامتقارن است. اختلاف تراز کف سیلابدشت و کانال اصلی ۲ متر می باشد. طول پل در نظر گرفته شده جهت عبور از رودخانه ۱۲۰ متر می باشد بنابراین با توجه به مقطع عرضی رودخانه در محل پل طول خاکریز ساخته شده در داخل سیلابدشت برابر با ۵۰ متر است. پل مورد مطالعه دارای ۶ دهانه ۲۰ متری است که با توجه به کوله های پل، مجموعاً ۵ پایه در محل رودخانه دارد که قطر پایه ها ۱/۵ متر می باشد. با توجه به تنگ شدن مقطع رودخانه در محل پل، تصمیم گرفته شد که برای عبور جریان با حداقل افت انرژی ممکن، از یک دیوار هدایت آب ربع بیضوی، با شعاع بزرگتر ۶۰ متر و شعاع کوچکتر ۲۴ متر در بالادست کوله سمت راست استفاده گردد. اطلاعات بیشتر جهت تعیین طول بهینه دیوار هدایت آب بیضوی، را می توان در مراجع معتبر یافت (کیلانئی و همکاران، ۱۳۹۲). با استفاده از نقشه های موجود، جهت مدلسازی محیط ساحل چپ و راست به صورت مرزهای جامد و با فرمت STL در محیط AutoCAD ساخته شد و سپس به برنامه Flow-3D (قسمت هندسه و شبکه بندی) وارد شد. شکل زیر نمایی از ساحل چپ، ساحل راست و محدوده مدلسازی ساخته شده پس از ورود به نرم افزار را نشان می دهد.

همانطور که در شکل (۵) قابل مشاهده است، در سیلابدشت با نزدیک شدن به محل اتصال به کانال اصلی، مقدار تنش برشی افزایش می یابد. این موضوع بدلیل انتقال مومنتوم بین سیلابدشت و کانال اصلی است (Tominaga and Nezu, 1991). در کانال اصلی با نزدیک شدن به دیوار خارجی نقطه عطفی در نمودار توزیع تنش در مدل آزمایشگاهی قابل مشاهده است. این نقطه عطف بدلیل وجود جریانات چرخشی در کف کانال ایجاد می گردد (Tominaga and Nezu, 1991). علیرغم نزدیکی کلی نتایج توزیع تنش برشی بین مدل آزمایشگاهی و مدل عددی، این نقطه عطف در مدل عددی دیده نشد که می تواند بدلیل مدل آشفتگی مورد استفاده باشد. نمودارهای رسم شده حاکی تطابق قابل قبولی بین نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی است و نشان می دهد که مدل عددی توانایی شبیه سازی جریان در کانال مرکب را دارد.

۴- شبیه سازی جریان در محل پل خورش رستم

پل مورد مطالعه بر روی رودخانه قزل اوزن در حد فاصل روستای کمر و روستای گاو از توابع شهرستان خلخال در استان اردبیل واقع گردیده است. به منظور انجام بررسی جریان در محل پل، تعیین دبی طراحی و اطلاعات هندسی رودخانه در محدوده پل ضروری است. بر اساس مطالعات هیدرولوژی، حداکثر دبی سیلاب با دوره



شکل ۶. نمایی از ساحل چپ، ساحل راست و محدوده مدل‌سازی

۱-۴- ابعاد و اندازه بلوک محاسباتی

برای مدل‌سازی محیط یک بلوک محاسباتی با ابعاد 225×130 متر در نظر گرفته شد. تعداد سلول‌ها در جهت پلان 29250 است که با توجه به در نظر گرفتن ۸ لایه عمقی در مجموع 234000 سلول محاسباتی مورد استفاده قرار گرفت. به علت نیاز به دقت بالاتر محاسباتی در اطراف پایه‌ها، ابعاد سلول‌ها در نزدیک پایه‌ها ریزتر شد. با توجه به محورهای نشان داده شده در شکل (۶)، ابعاد المان در راستای X، بین $0/30$ تا $1/3$ متر و در راستای Y، بین $0/30$ تا 1 متر متغیر بوده است. ابعاد المان در راستای Z نیز $0/725$ متر انتخاب شده است. انتخاب این ابعاد با این فرض صورت پذیرفته است که در عین حالیکه ابعاد المان‌ها تا حدی بزرگ باشد که زمان شبیه‌سازی به درازا نینجامد، این ابعاد تا حدی کوچک باشد که نتایج مورد نیاز در اطراف عناصر مختلف سازه قابل دستیابی باشد.

۲-۴- شرایط مرزی

با توجه مطالعات هیدرولوژیکی انجام شده، مقادیر دبی حداکثر سیلاب به ازای دوره های بازگشت مختلف محاسبه شده است. از دبی سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ سال، جهت طراحی هیدرولیکی استفاده گردید که این مقدار با توجه مطالعات انجام شده 1650 مترمکعب بر ثانیه می‌باشد.

برای حل معادلات حاکم بر حرکت سیال لازم است در مرزهای جریان شرایط مرزی را اعمال کرد. شرایط مرزی که در حالت کلی مورد نیاز است، عبارتند از: شرط مرزی ورودی، شرط مرزی خروجی و شرط مرزی دیواره. با توجه به اینکه دبی رودخانه معلوم و برابر با 1650 متر مکعب بر ثانیه است در مرز بالادست یا ورودی از نوع دبی معلوم اعمال می‌شود. در مرز پایین‌دست، شرایط مرزی تراز معلوم که برابر با عمق $3/5$ متر است در نظر گرفته شده است (کیلانته‌ئی و همکاران، ۱۳۹۲). با توجه به محدودیت‌های ذکر شده

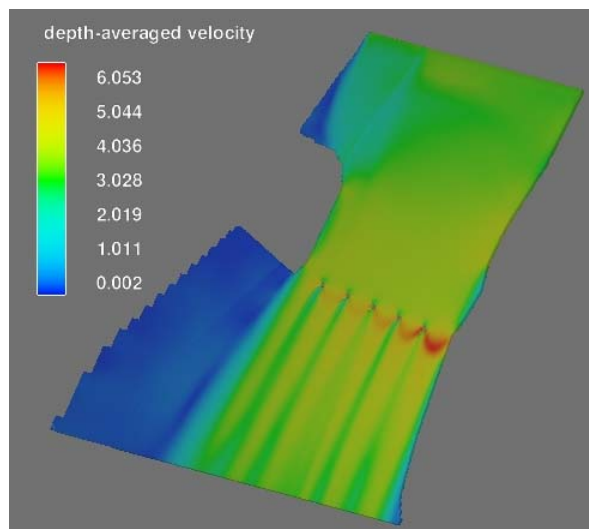
جهت پایداری مدل در بخش توسعه مدل عددی، گام زمانی اولیه حل برابر با $0/1$ ثانیه در نظر گرفته شده است. تمامی شکل‌ها و نمودارها ارائه شده به عنوان نتایج، مربوط به پایان زمان شبیه‌سازی و همگرایی کامل مدل می‌باشند.

۳-۴- شرایط اولیه

در تمام روش‌های عددی، لازم است برای کلیه پارامترها در تمام نقاط شبکه، مقادیری به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفت تا مدل توسعه داده شده، بتواند در روند انجام محاسبات با تصحیح آنها به جواب مورد نظر با دقت مناسب دست یابد. اگر چه با توجه به شرایط مرزی و توسعه زمانی حل معادلات، اثر شرایط اولیه به تدریج از بین می‌رود و دقت زیاد در شرایط اولیه تاثیری در جواب نهایی ندارد. اما شرایط اولیه مناسب، نقش بسزایی در سرعت همگرایی مدل دارد و باعث کاهش زمان انجام محاسبات می‌شود. بنابراین انتخاب شرایط اولیه نزدیک به مقادیر واقعی، بهترین گزینه خواهد بود. شرایط اولیه در مدل حاضر شامل تراز سطح آزاد و سرعت‌های اولیه می‌باشند که تراز اولیه برابر با تراز پایین‌دست و سرعت‌ها اولیه برابر با $2/35$ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شوند. این سرعت با توجه به دبی ورودی و عرض و عمق متوسط جریان محاسبه شد.

۴-۴- اجرای مدل

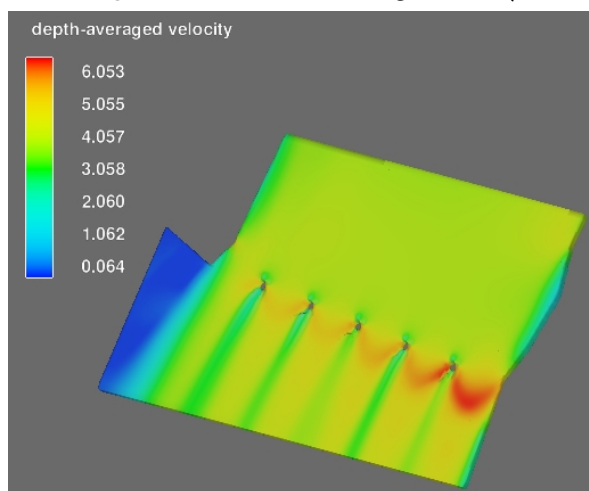
با شرایط توصیف شده مدل اجرا شده و نتایج در شکل‌های (۷) تا (۱۶) ارائه گردیده است. در شکل‌های (۷) تا (۱۰) مقدار متوسط سرعت در محدوده‌های مختلفی نشان داده شده است. حداکثر سرعت متوسط در ساحل سمت چپ و در دهانه انتهایی آن قسمت رخ می‌دهد. همانطور که در شکل‌های مذکور قابل مشاهده است، توزیع غیریکنواخت سرعت در عرض دهانه‌های پل مشهود است بطوریکه اختلاف سرعت حدود ۳۰ درصدی مشاهده می‌گردد.



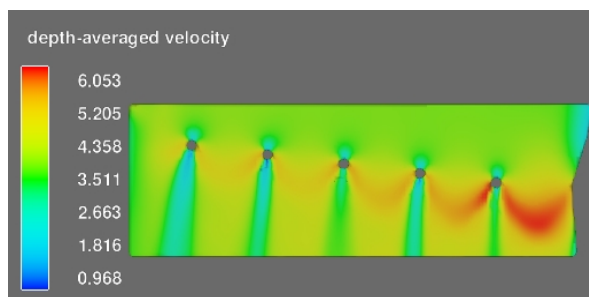
شکل ۷. مقادیر سرعت متوسط عمقی جریان

سیلاب‌دشت سمت راست سبب تبدیل شدن کانال به کانال مرکب غیرمقارن گردیده است و همین امر از دلایل توزیع غیریکنواخت جریان در عرض کانال است.

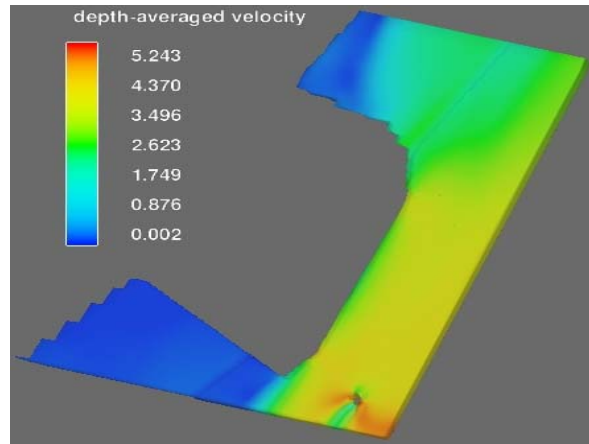
علت افزایش سرعت در ساحل سمت چپ نیز وجود سیلاب‌دشت در ساحل سمت راست و هندسه محل مورد مطالعه در پلان است که جریان را به سمت ساحل سمت چپ سوق می‌دهد.



شکل ۸. مقادیر سرعت متوسط عمقی جریان در محدوده پل



شکل ۹. مقادیر سرعت متوسط عمقی جریان در محدوده پایه‌ها



شکل ۱۰. مقادیر سرعت متوسط عمقی جریان در محدوده کوله

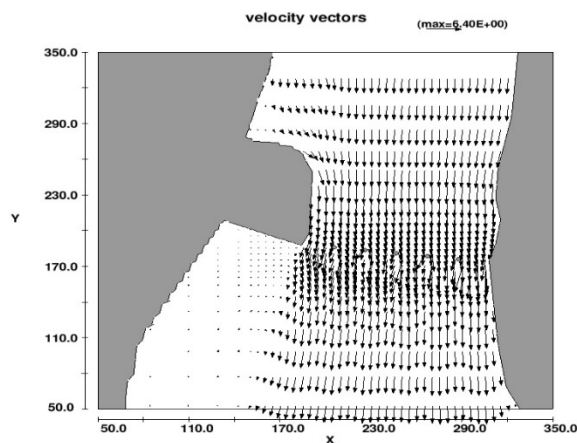
حداکثر سرعت جریان در اطراف پایه‌ها نیز در جدول (۱) دیده می‌شود. اختلاف ۱۵ درصدی بین حداکثر و حداقل سرعت در اطراف پایه‌ها وجود دارد (شماره پایه‌ها در شکل (۱۴) نشان داده شده است).

جدول ۱. حداکثر سرعت و تنش برشی در اطراف پایه‌ها

شماره پایه	حداکثر تنش برشی (SI)	حداکثر سرعت متوسط عمقی (SI)
۱	۱۴۵/۵۲۹	۵/۲۴۳
۲	۱۶۹/۹۷۳	۵/۳۲۲
۳	۱۸۵/۶۰۸	۵/۵۰۵
۴	۱۸۵/۰۵۷	۵/۴۵۸
۵	۲۱۸/۱۳۱	۶/۰۵۳

از ۱۲۰ درصد از حداکثر سرعت در اطراف کوله بیشتر است. در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب بردارهای سرعت در پلان و مقطع بالادست پل ارائه گردیده است. تمایل جریان به ساحل سمت چپ و گردابه‌های ثانویه در مقطع به راحتی قابل مشاهده است.

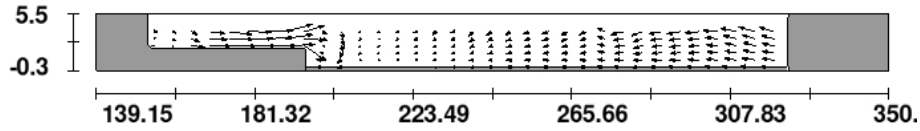
همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد وجود کوله با دیوار هدایت تقریباً بیضوی سبب عملکرد مناسب کوله و تعدیل جریان عبوری از اطراف کوله شده است. سرعت در اطراف کوله حدوداً ۱۵ تا ۲۰ درصد بیشتر از سرعت جریان بالادست (۲/۳۵ متر بر ثانیه) است. از طرف دیگر حداکثر سرعت در بین دهانه‌ها بیش



شکل ۱۱. بردارهای سرعت در پلان

velocity vectors

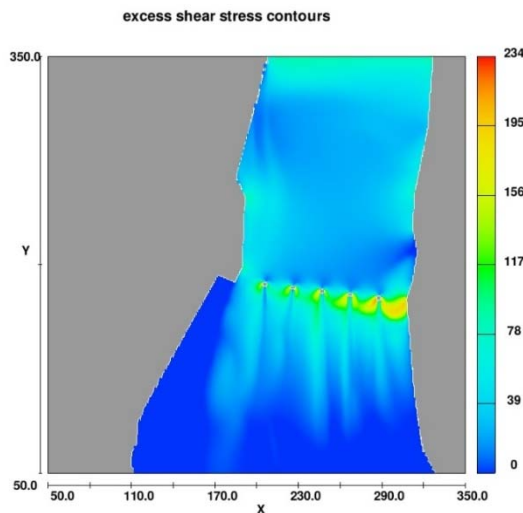
(max=7.40E-01)



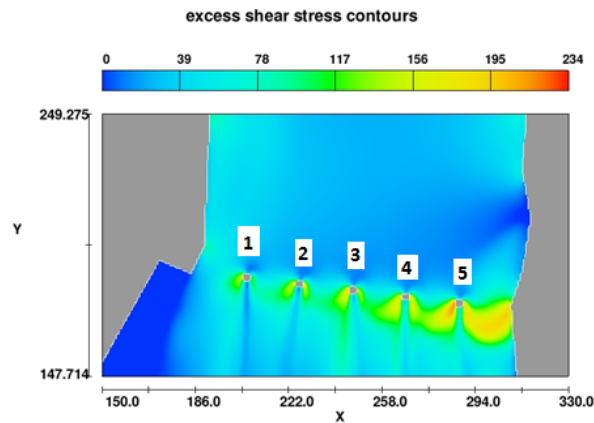
شکل ۱۲. بردارهای سرعت در مقطع قبل از پل

است. حداکثر مقدار تنش برشی نیز در محل پل در بستر ساحل سمت چپ رخ می‌دهد. حداکثر تنش برشی در فاصله کمی از پایین‌دست پایه شماره ۵ ایجاد شده است. تغییرات تنش برشی در اطراف پایه‌ها هم در جدول (۱) بیان شده است. تغییرات تنش برشی در حدود ۵۰ درصد است.

از آنجاکه تنش برشی ایجاد شده در بستر می‌تواند سبب ایجاد نیرویی برای آبشستگی باشد، بررسی پارامتر تنش برشی بسیار مهم است (Asadi et. al., 2022). در شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) مقادیر تنش برشی در بستر کانال اصلی و بستر سیلاب‌دشت ارائه شده



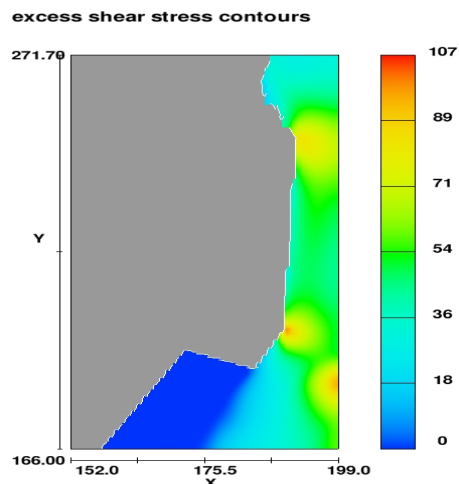
شکل ۱۳. تغییرات تنش برشی نزدیک بستر کانال اصلی



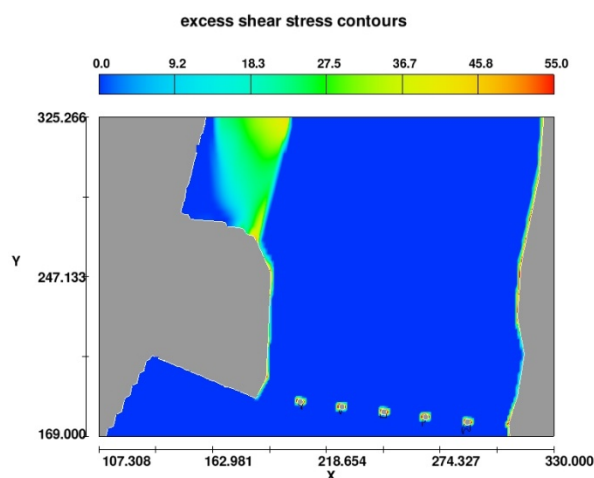
شکل ۱۴. تغییرات تنش برشی نزدیک بستر کانال اصلی در محدوده پایه‌ها

سیلاب‌دشت را نشان می‌دهد. گرچه که مقدار این تنش نسبت به بستر کانال اصلی در محل پایه‌ها بسیار کمتر است اما می‌تواند تحت شرایطی باعث تغییر شکل بستر کانال شده و در نتیجه تغییر رفتار جریان در محل پل نیز بشود.

با استفاده از شکل (۱۵) حداکثر تنش برشی در اطراف کوله سمت راست حدود ۳۵ درصد کمتر از تنش برشی در اطراف پایه شماره ۱ است که باز هم نشان داده دیوار هدایت آب تا چه میزان در حفاظت کوله موثر عمل می‌کند. شکل (۱۶) نیز تنش برشی در تراز



شکل ۱۵. تغییرات تنش برشی نزدیک بستر کانال اصلی در محدوده کوله سمت راست



شکل ۱۶. تغییرات تنش برشی نزدیک بستر کانال سیلاب‌دشت

۵- نتیجه‌گیری

بر اساس گزارشات تحقیقاتی متعددی که وجود دارد، عامل اصلی تخریب پل‌های رودخانه‌ای، عوامل هیدرولیکی است. عوامل هیدرولیکی عمدتاً به آبستنگی خاک زیر پایه‌های میانی و یا پایه‌های کناری منتج شده و سبب از بین رفتن عملکرد پل می‌گردد. هر چه پیچیدگی جریان در محل پل بیشتر باشد، نیاز به بررسی‌های فنی دقیق‌تر و اتخاذ تصمیماتی برای عبور ایمن جریان سیل از محل پل بیشتر می‌گردد. در مواردی که مقطع رودخانه در محل پل، کانال مرکب نامتقارن باشد، جریانات ثانویه متعددی رخ می‌دهد. برای بررسی موضوع، بدلیل وجود مقطع مرکب نامتقارن، تحلیل جریان در محل پل خورش رستم واقع بر رودخانه قزل اوزن صورت پذیرفت. بدین منظور از نرم‌افزار FLOW-3D جهت شبیه‌سازی سه بعدی جریان استفاده گردید و نتایج زیر حاصل شد. مشاهده گردید که علیرغم استفاده از دیوار هدایت آب در اطراف کوله ساحل سمت راست، اما همچنان توزیع غیریکنواختی در عبور

بر اساس گزارشات تحقیقاتی متعددی که وجود دارد، عامل اصلی تخریب پل‌های رودخانه‌ای، عوامل هیدرولیکی است. عوامل هیدرولیکی عمدتاً به آبستنگی خاک زیر پایه‌های میانی و یا پایه‌های کناری منتج شده و سبب از بین رفتن عملکرد پل می‌گردد. هر چه پیچیدگی جریان در محل پل بیشتر باشد، نیاز به بررسی‌های فنی دقیق‌تر و اتخاذ تصمیماتی برای عبور ایمن جریان سیل از محل پل بیشتر می‌گردد. در مواردی که مقطع رودخانه در محل پل، کانال

میانی و کوله‌های در نزدیکی مرز بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی اجتناب گردد.

مطابق الگوی سرعت، تنش‌برشی نیز در اطراف پایه‌ها و دهانه‌های ساحل سمت چپ تا حد زیادی بیشتر از پایه‌ها و دهانه‌های ساحل سمت راست است که این امر نیز بدلیل وجود دیوار هدایت آب در راستای کاهش تنش‌ها در ساحل سمت راست و همچنین هدایت جریان به سمت ساحل سمت چپ به دلیل ماهیت نامتقارن بودن مقطع رودخانه در محل پل مورد مطالعه می‌باشد.

جریان در محل پل اتفاق افتاد به نحوی که سرعت در دهانه‌های نزدیک ساحل سمت چپ تا حدود ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که ایمن سازی پایه‌ها و کوله سمت چپ، باید مدنظر طراح و کارفرما حین بهره‌برداری باشد.

استفاده از دیوار هدایت آب در ساحل سمت راست، کمک بسیاری در عبور جریان با کمترین افت انرژی از محل کوله سمت راست داشته است که این امر می‌تواند هزینه‌های نگهداری حین بهره‌برداری را تا حد زیادی کاهش دهد.

جریانات ثانویه رخ داده در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت می‌تواند سبب ایجاد تنش‌های برشی قوی در این مرز گردد، بنابراین پیشنهاد می‌گردد تا حد امکان از قرار دادن پایه‌های

۶-مراجع

-Asadi, M., Kilanehei, F. and Mahjoob, A., (2022). Numerical Study of Road Embankment Type Action on Shear Stress around Skewed Bridge Abutment. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, Vol. 17, No. 4, 95-119.

-Biron, P. M., C. Robson, M. F. Lapointe, and S. J. Gaskin (2004). Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields, *Earth Surface. Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (11), 1403-1415.

-Erduran, K. S., Seckin, G., Kocaman, S. and Atabay, S., (2012). 3D Numerical Modelling of Flow around Skewed Bridge Crossing. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 6(3), 475-489.

-Schlichting, H. (1968), *Boundary- Layer Theory*, 6th Ed., McGrawHill Book Co., Inc., New York, N.Y.

-Singh, P., Tang, X. & Ijaz, H., (2023). On asymmetric compound open channel flows with two distinct width floodplains: revisiting interfacial mixing layer and flow structures. *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 23, 799-827.

doi.org/10.1007/s10652-023-09931-3

-Tominaga, A. and Nezu, I., (1991). Turbulent structure in compound open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 1, 21-41.

-Zhang, C.X., (1994). Numerical predictions of turbulent recirculating flows with a k-e model. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 51, 177-201.

-حمیدی فر، حسین. و امید، محمد حسین (۱۳۹۱). شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در آبراهه‌های با مقطع مرکب با مدل Flow-3D. *یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه*.

-دانکو، علی، یونسی، حجت الله و صانعی، مجتبی (۱۴۰۲). بررسی میدان جریان نزدیک شونده به عرشه پل در مقاطع مرکب با پوشش گیاهی. *تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی*، دوره ۲۴، شماره ۹۲، ۸۷-۶۹.

-رحیمی، ابراهیم و رحیم‌پور، مجید (۱۳۹۵). تاثیر پارامترهای هندسی بر توزیع سرعت در کانال‌های روباز با مقطع مرکب. *مجله پژوهش آب ایران*، جلد ۱۰، شماره ۱، ۱۹-۱۱.

-صفائی، سعید و کیلانه‌ئی، فواد و محجوب، امیر (۱۳۹۹). مدلسازی عددی تاثیر طول کوله پل در سیلاب‌دشت بر تنش برشی بستر و مومنتوم جریان. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، جلد ۲۷، شماره ۶، ۱۸۴-۱۶۹.

-کیلانه‌ئی، فواد، محجوب، امیر و منتظری نمین، مسعود (۱۳۹۲). توسعه مدل عددی دوبعدی در پلان به منظور بررسی شکل دیوار هدایت آب پل‌ها. *مجله علمی پژوهشنامه حمل و نقل*، سال دهم، شماره اول، ۷۱-۵۵.

Three-dimensional Numerical Modeling of Flow in an Asymmetric Compound Channel at a River Bridge Site (Case Study: Khoresh Rostam Bridge in Khalkhal)

*Amir Mahjoob, Assistant Professor, Transportation Research Institute,
Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.*

*Kheirollah Khademi, Assistant Professor, Transportation Research Institute,
Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.*

E-mail: a.mahjoob@bhrc.ac.ir

Received: November 2024- Accepted: February 2025

ABSTRACT

River bridges are among the most vulnerable technical structures of roads and railways in terms of flood risk. In the meantime, the characteristics of the river are effective in the flood that occurs and the damage that can be caused to the bridge structure. One of the common cross-sections, which is especially observed in rivers and natural streams, is compound sections. Asymmetric compound sections are one of the types of compound sections that cause flow conditions at the bridge site to be complicated. In this research, various dimensions of the problem have been investigated from a hydraulic perspective by means of three-dimensional numerical simulation of the flow at the bridge site. In this regard, FLOW-3D software has been used. After briefly introducing the software and explaining how to calculate important hydraulic parameters such as kinetic energy, energy loss and shear stress in the software, in order to ensure the proper performance of the aforementioned software, the results have been validated with a laboratory model. The model was used to simulate the flow at the Khursh Rostam Bridge in Khalkhal. The bridge is located in a narrow river span with an asymmetric compound cross-section with an elliptical water guide wall. The modeling results showed that although the use of an elliptical water guide wall on the right bank has protected the bridge abutment against severe changes in velocity and shear stress, the geometric shape of the river cross-section at the bridge site causes non-uniform flow distribution at the bridge piers. So that the shear stress around the piers, which is the main cause of scour and can cause bridge destruction, will vary by about 50 percent.

Keywords: Scour, River Bridge, FLOW-3D, Asymmetric Compound Channel, 3D Simulation