

تأثیر پیشروی نامتقارن خاکریزهای دسترسی پل‌های بیه‌دار بر جریان

مقاله علمی - پژوهشی

مهدی اسدی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
امیر محجوب*، استادیار، پژوهشکده حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
فواد کیلانته‌ئی، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.mahjoob@bhrc.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۵

صفحه: ۱-۱۴

چکیده

در هنگام ساخت پل بر روی مقطع رودخانه، برای کاهش طول سازه‌ی عرشه پل بدلیل اقتصادی و اجرایی، معمولاً قسمتی از سیلاب‌دشت رودخانه در دو طرف با خاکریزهای دسترسی مسدود می‌گردد. این امر موجب تنگ‌شدگی در مسیر رودخانه و تغییر در شرایط هیدرولیکی جریان می‌گردد. با زیاد شدن گرادیان سرعت در مقطع تنگ‌شده، تنش برشی وارد بر بستر رودخانه نیز افزایش می‌یابد. افزایش تنش برشی می‌تواند باعث فرسایش در بستر رودخانه و در محل پایه‌ها و کوله‌ها شود و پل را در معرض آسیب‌های هیدرولیکی قرار دهد. از طرف دیگر، گاهی اوقات راستای محور پل، عمود بر راستای جریان نیست و اصطلاحاً پل، زاویه بیه دارد. در این پل‌ها، خاکریزهای دسترسی را با توجه به محل قرارگیری آنها در مسیر جریان آب و نحوه عملکردشان، می‌توان خاکریز هدایت‌کننده و شکافنده جریان نامید. در این مقاله به بررسی تأثیر پیشروی متقارن و نامتقارن خاکریزهای دسترسی پل بیه‌دار در سیلاب‌دشت بر هیدرولیک جریان پرداخته شده است. برای بهتر شدن شرایط هیدرولیکی عبور جریان از محل خاکریز شکافنده، پیشروی نامتقارن خاکریزهای دسترسی پیشنهاد و بررسی شده است. بدین منظور مدل‌سازی سه‌بعدی جریان در دستور کار قرار گرفت. در ابتدا، مدل عددی بر اساس مطالعات تجربی موجود صحت‌سنجی شد. سپس، اثرات پیشروی متقارن خاکریزهای دسترسی در زوایای مختلف بیه پل، ارزیابی شد و در ادامه پیشروی نامتقارن خاکریزهای دسترسی جهت کاهش تنش برشی در مقطع رودخانه پیشنهاد و بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهد که پیشروی ۷۰ درصدی خاکریز هدایت‌کننده جریان در زاویه بیه بحرانی، با توجه به ثابت بودن مقطع عبوری جریان، باعث کاهش حداکثر سرعت و تنش برشی به ترتیب به مقدار ۱۴ و ۳۵ درصد در مقطع رودخانه‌ی مورد مطالعه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آب‌شستگی، بیه پل، خاکریز دسترسی، مدل‌سازی عددی، هیدرولیک جریان

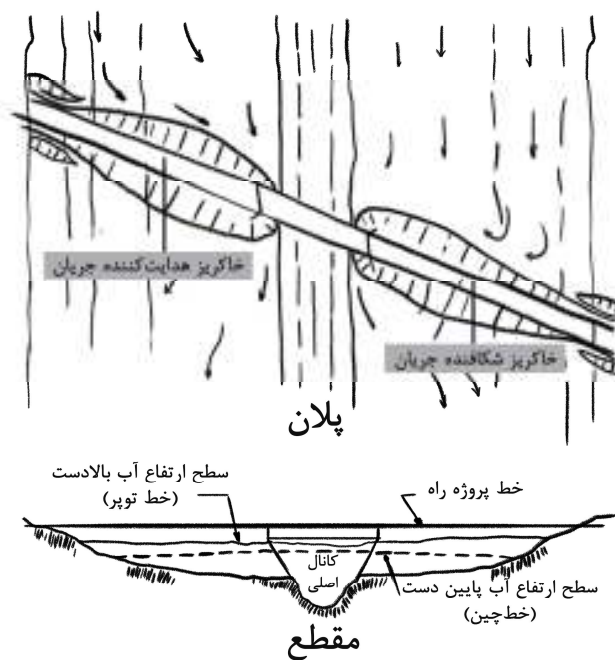
۱-مقدمه

است (Tang, 2017). در شرایط وقوع سیلاب معمولاً ظرفیت کانال اصلی برای عبور جریان کافی نیست و جریان وارد سیلاب‌دشت می‌شود. در این شرایط رودخانه به صورت یک مقطع مرکب عمل خواهد کرد. جریان در مقطع مرکب بدلیل تفاوت در شکل هندسی و اختلاف قابل توجه زبری در کانال اصلی و سیلاب‌دشت دارای ساختار پیچیده‌تری نسبت به یک کانال ساده است (Fernandes et al.,

رودخانه‌های طبیعی مجراهایی هستند که برای انتقال آب ناشی از ذوب‌شدگی برف‌ها و یا بارندگی از بالادست به پایین‌دست به وجود آمده‌اند. این رودخانه‌ها در طول حیات خود شاهد سیلاب‌های فراوانی بوده‌اند که موجب تشکیل سیلاب‌دشت(ها) در مجاورت کانال اصلی شده‌اند. مقطع رودخانه‌های طبیعی معمولاً به شکل یک مقطع مرکب است که از یک کانال اصلی و یک یا دو سیلاب‌دشت تشکیل شده

رودخانه شده و می‌تواند عامل حرکت ذرات بستر و ایجاد فرسایش گردد. گاهی اوقات راستای پل نسبت به خط عمود بر محور رودخانه دارای زاویه است که اصطلاحاً به آن پل بیه‌دار گفته می‌شود. در این شرایط خاکریزهای دسترسی را با توجه به محل قرارگرفتن آن‌ها در مسیر رودخانه و نحوه عملکردشان می‌توان خاکریز هدایت‌کننده جریان و خاکریز شکافنده جریان نامید (شکل ۱). عدم وجود تقارن و محل قرارگیری این خاکریزها در مسیر رودخانه باعث پیچیده‌تر شدن شرایط نسبت به حالت پل بدون بیه (بیه صفر درجه) بخصوص در اطراف خاکریز شکافنده جریان می‌شود. این امر می‌تواند خطر فرسایش بستر رودخانه را به طور فزاینده‌ای افزایش دهد. در شکل (۱) پلان و مقطع یک پل بیه‌دار در یک کانال مرکب نشان داده شده است (Thomason, 2019).

2015). از طرف دیگر، در هنگام سخت پل بر روی مقطع رودخانه، بدلائل اقتصادی و اجرایی معمولاً قسمتی از سیلاب‌دشت که در راستای محور راه عبوری قرار دارد، توسط خاکریزهای دسترسی مسدود می‌گردد. این امر موجب کاهش سطح مقطع جریان در محل پل می‌شود. در این مقاله نسبت طول خاکریز دسترسی در راستای عمود بر رودخانه (L) به طول سیلاب‌دشت (L_f) نسبت پیشروی (L/L_f) نامیده می‌شود. پل‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های آبی هستند. علل اصلی خرابی بسیاری از پل‌ها قبل از پایان عمرشان، عدم توجه به معیارهای هیدرولیکی است (Wardhana and Hadipriono, 2013). پدیده فرسایش بستر رودخانه در اثر تنگ‌شدگی و یا ایجاد مانع در محل پل، مهم‌ترین عامل هیدرولیکی تخریب پل است. زیاد شدن گرادیان سرعت در محل تنگ‌شدگی باعث افزایش تنش برشی در بستر



شکل ۱. پلان و مقطع پل بیه‌دار در کانال

عمق آب‌شستگی انجام دادند، دریافتند که با افزایش نسبت پیشروی، تنش برشی و عمق آب‌شستگی در جلوی کوله افزایش می‌یابد (Kouchakzadeh and Townsend, 1997). سکین آزمایشاتی مربوط به پیش‌بینی پروفیل تراز سطح آب در کانال مرکب همراه با تنگ‌شدگی توسط خاکریزهای دسترسی و کوله با دیواره عمودی برای پل‌های با

پیش از این تحقیقاتی در خصوص مسایل مطرح شده مورد توجه محققین مختلفی بوده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌گردد. در ابتدا مطالعات آزمایشگاهی و در ادامه مطالعات عددی بیان شده است. در مطالعات آزمایشگاهی، کوچک‌زاده و تاونسند در آزمایشاتی که بر روی تاثیر نسبت پیشروی خاکریز دسترسی بر تنش برشی و

در مطالعات عددی، 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، چهار نوع پل در زوایای بیه ۳۰ و ۴۵ درجه بوده است. نتایج مدل عددی با خروجی‌های مدل‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شد و این مقایسه حاکی از تطابق خوب نتایج پروفیل برگشت آب در بالادست پل را داشت (Erduran et al., 2012). در مطالعه دیگری مورالس و اما تاثیر طول خاکریز دسترسی بر روی سرعت و تنش برشی بستر در یک کانال مرکب نامتقارن با استفاده از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی دوبعدی را بررسی کردند. آن‌ها نسبت‌های پیشروی متفاوتی را برای خاکریز دسترسی در نظر گرفتند. ایشان دریافتند که حداکثر مقدار سرعت در جلو کوله و حداکثر تنش برشی بستر در لبه بالادست کوله اتفاق می‌افتد و هرچه نسبت پیشروی خاکریز دسترسی افزایش می‌یابد مقدار تنش برشی نیز بیشتر می‌گردد (Morales and Ettema, 2013). کریمی و زراتی، آب‌شستگی در محل تنگ‌شدگی کوله پل با استفاده از مدل عددی SSIIM2 و همچنین به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج مدل عددی با مشاهدات آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت و مشخص گردید که دقت مدل‌های عددی سه‌بعدی مانند مدل استفاده شده در تحقیق آن‌ها، با توجه به دقت مورد نیاز در کارهای مهندسی در حد قابل قبولی قرار داشته و می‌توان در مسائل پیچیده حرکت آب و رسوب در مهندسی رودخانه مثل آب‌شستگی در اطراف کوله‌ها و آب‌شکن‌ها از آن استفاده کرد (کریمی و زراتی، ۱۳۹۲). چوآ و همکاران تاثیر نسبت پیشروی خاکریزهای دسترسی بر جریان را در یک کانال مرکب نامتقارن با دو سیلاب‌دشت مورد بررسی قرار دادند. طول خاکریزهای دسترسی متفاوت بوده و خاکریزی که در سیلاب‌دشت بزرگ‌تر قرار دارد، نسبت پیشروی‌های متفاوت دارد. مقایسه کاملی از متغیرهای مختلف جریان بین دو خاکریز در اثر انقباض جریان (تنگ‌شدگی) صورت گرفته است. نتایج نشان داد که میزان پیشروی در سرعت جریان و نوع شکل‌گیری گردابه‌های اطراف خاکریزها تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارد (Chua et al., 2019). محجوب و کیلانه‌ئی تاثیر زاویه بیه پل و مقدار

و بدون بیه انجام داد. در این آزمایشات ۵ نوع مختلف پل مورد استفاده قرار گرفت و دو زاویه بیه ۳۰ و ۴۵ برای هر کدام از این پل‌ها آزمایش شدند. نتایج آنها با حالت بدون بیه مقایسه شدند و یک نمودار طراحی جدید برای تخمین فرآب پیشنهاد گردید (Seckin, 2007). فرناندز و همکاران اثر زبری سیلاب‌دشت بر روی سرعت جریان در یک کانال مرکب را بررسی کردند. آنها دریافتند که با افزایش زبری، گرادیان سرعت افزایش یافته و به تبع آن تنش‌های رینولدزی نیز افزایش می‌یابد (Fernandes et al., 2012). هاشمی‌کیا و همکاران، به بررسی تنش برشی در کانال مرکب پرداختند. آزمایشات به روش انرژی (تکنیک استفاده از لوله پرستون) در سه دبی مختلف انجام گرفت. آنها دریافتند که در هر یک از حالت‌های دبی جریان، با افزایش عمق جریان میزان تنش برشی افزایش می‌یابد (هاشمی‌کیا و همکاران، ۱۳۹۶). شاه‌حسینی و یو به بررسی آب‌شستگی در اطراف چهار پایه‌ی مختلف پل از لحاظ هندسی و با زاویه در برابر جریان آب پرداختند. نتایج نشان داد که میزان آب‌شستگی در پایه پل، به شکل و زاویه برخورد جریان آب بستگی دارد. کمترین میزان آب‌شستگی به ترتیب متعلق به پایه لوزی‌شکل با زاویه ۳۰ درجه، پایه لوزی‌شکل با زاویه ۶۰ درجه، پایه پل با لبه‌های نیم‌دایره و پایه استوانه‌ای‌شکل بود (Shahhosseini and Yu, 2019).

در آزمایشی دیگر، یانگ و همکاران آزمایشاتی در خصوص پایه‌های پل در حالت با و بدون زاویه بیه انجام دادند و دریافتند که با بیه‌دار شدن پایه پل، سرعت آب‌شستگی در اطراف پایه‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد (Yang et al., 2019). صمدی‌رحیم و همکاران، تاثیر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت بر روی هیدرولیک جریان در آبراهه‌های مرکب واگرا را بررسی کردند. آنها دریافتند که حضور پوشش گیاهی بر روی سیلاب‌دشت موجب کاهش شدید تنش برشی بستر در این ناحیه و افزایش آن در آبراهه اصلی می‌گردد. به طوری که، با افزایش عمق نسبی جریان، تنش برشی بستر در آبراهه اصلی به صورت خطی و بر روی سیلاب‌دشت به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد (صمدی‌رحیم و همکاران، ۱۴۰۰).

سرعت جریان و تنش برشی بستر در اطراف خاکریز دسترسی در یک کانال مرکب متقارن برای نسب پیشروی‌های متقارن و نامتقارن مورد بررسی قرار گرفته است. فرضیات و نتایج شبیه‌سازی ارایه گردیده و نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- نرم‌افزار FLOW-3D

یکی از مدل‌های عددی پرکاربرد، بخصوص در سال‌های اخیر، مدل FLOW-3D است. این مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی جریان آب، انتقال رسوب و آب‌شستگی دارد و مدل مناسبی برای شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی هیدرولیکی است. معادلات پایه‌ای مورد استفاده در این مدل، بر مبنای حل معادلات ناویه-استوکس سه‌بعدی و معادله پیوستگی است. این مدل به طور هم‌زمان معادلات سه‌بعدی ناویه-استوکس و معادله پیوستگی را حل می‌کند. معادلات ناویه-استوکس و پیوستگی مورد استفاده در FLOW-3D برای جریان‌های غیر قابل تراکم در ادامه آمده است (Flow Science, Inc., 2008).

پیشروی خاکریزهای دسترسی را در سرعت و تنش برشی در یک کانال مرکب با استفاده از مدل سه‌بعدی توسعه‌داده‌شده بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه بیه، تنش برشی در اطراف خاکریزهای هدایت‌کننده جریان، کاهش پیدا می‌کند. اما در اطراف خاکریزهای شکافنده جریان روند افزایشی داشته است. با این تفاوت که در نسبت پیشروی ۲۵ درصد، تنش برشی در زاویه بیه ۴۵ درجه بیشترین بوده است، در حالی که برای نسبت پیشروی‌های ۵۰ و ۷۵ درصد، تنش برشی در زاویه بیه ۳۰ درجه، بیشترین بوده است و در زاویه ۴۵ درجه کاهش پیدا کرده است (Mahjoob and Kilanehei, 2020).

با بررسی مطالب اشاره شده، می‌توان چنین استنباط کرد که مطالعه عملکرد و نسبت پیشروی خاکریز دسترسی پل بیه‌دار در مقطع مرکب می‌تواند در جهت شناخت بهتر جریان به مهندسین طراح پل، مفید واقع گردد. این در حالیست که بررسی تاثیر نسبت پیشروی متقارن و نامتقارن خاکریز دسترسی بر روی تغییرات سرعت جریان و تنش برشی بستر در سیلاب‌دشت و کانال اصلی بین آنها کم‌تر مورد توجه بوده است. در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + G_i + f_i \quad (2)$$

در روابط فوق، u_i سرعت متوسط، P فشار، A_i کسر مساحت باز برای جریان در راستای i ، V_f کسر حجم باز برای جریان، G_i شتاب ناشی از نیروهای وزنی، f_i نیز شتاب ناشی از ویسکوزیته است که بر اساس روابط زیر تعیین می‌گردند.

$$\rho V_f f_i = \tau_{b,i} - \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (A_j S_{ij}) \right] \quad (3)$$

$$S_{ii} = -2\mu_{tot} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right], S_{ij} = -\mu_{tot} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

که در این روابط، S_{ij} نرخ تانسور تنش، $\tau_{b,i}$ تنش برشی دیواره، ρ دانسیته سیال، μ_{tot} ویسکوزیته دینامیکی کل که شامل اثرات آشفتگی است ($\mu_{tot} = \mu + \mu_T$)، μ ویسکوزیته دینامیکی و μ_T ویسکوزیته گردابی است.

در مدل‌های انتقال آشفتگی (همچون مدل $k-\epsilon$)، سرعت برشی، u_* ، با استفاده از روش تکرار و از فرمول (۵) محاسبه می‌شود (Smith and Foster, 2005):

$$u_o = u_* \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\rho u_* y_o}{\mu + \rho a u_* k_s} \right) + 5.0 \right] \quad (5)$$

که k ضریب فن-کارمن، a یک ثابت است که برای مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ و RNG برابر با ۰/۲۴۷ و در غیر اینصورت ۰/۲۴۶ است، k_s زبری و y_o فاصله از دیواره صلب تا محل سرعت مماسی (u_o)، مخرج معادله (۵) نیز نشان‌دهنده ویسکوزیته موثر است ($\mu_{eff} = \mu + \rho a u_* k_s$).

تنش برشی دیواره، $\tau_{b,i}$ نیز از فرمول (۶) به دست می‌آید.

$$\tau_{b,i} = \rho (u_*)^2 \quad (6)$$

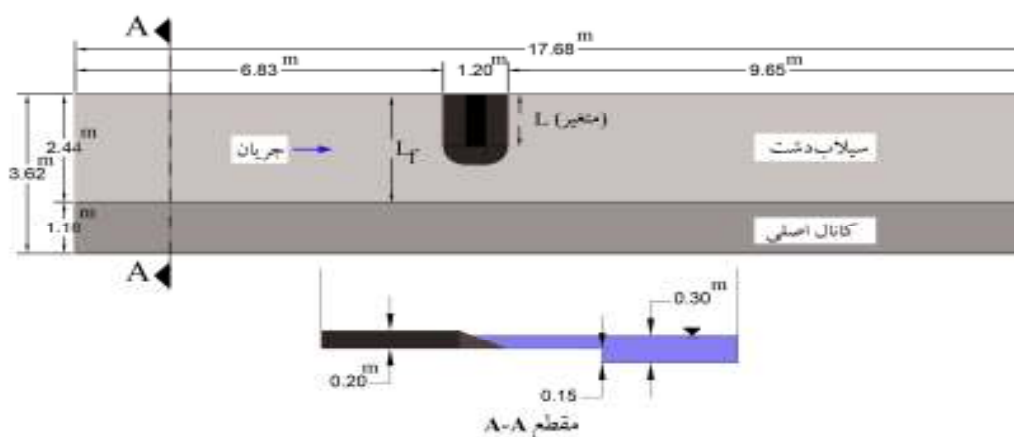
مساحت-حجم مانع در مدل FLOW-3D، شبکه حل به فرم مذکور یک مزیت خواهد بود.

۲-۲- صحت‌سنجی

برای اطمینان از عملکرد مناسب مدل عددی، از داده‌های آزمایشگاهی مورالس و اتما استفاده شده است (Morales and Ettema, 2013). مورالس و اتما اثر طول خاکریز دسترسی را بر سرعت جریان و تنش برشی بستر در یک کانال مرکب نامتقارن بررسی کردند. در شکل (۲) پلان و مقطع عرضی کانال آزمایشگاهی ارایه شده است.

مدل‌های آشفتگی مورد استفاده توسط FLOW-3D عبارتند از: طول اختلاط پرانتل، یک معادله‌ای انرژی جنبشی آشفتگی، مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ ، مدل گروه‌های نرمال شده و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ. شبکه حل در این مدل متشکل از سلول‌های مکعب‌مستطیلی است.

شاید این نوع شبکه در نگاه اول به عنوان یک محدودیت مطرح شود، در صورتیکه، اولاً به دلیل تولید آسان این نوع شبکه، نظم مناسب و نیاز به حافظه کمتر در آن و ثانیاً به دلیل بکارگیری دو ابزار مفید روش حجم سیال و روش کسر

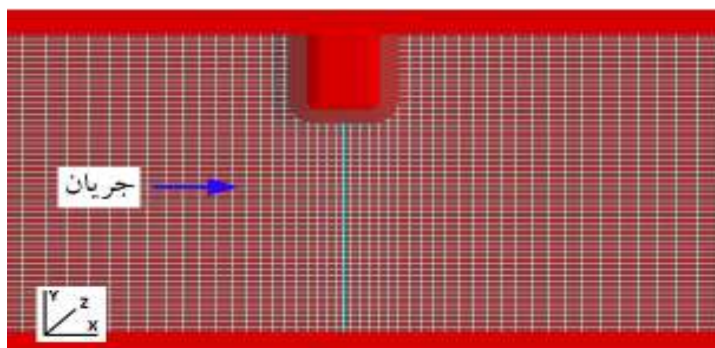


شکل ۲. پلان و مقطع عرضی کانال آزمایشگاهی مورالس و اتما

انتخاب شده است. برای دیواره و کف کانال، شرط مرزی دیوار و برای سطح آزاد آب، شرط مرزی متقارن تعیین شده است.

در شکل (۳) شبکه‌بندی مدل جهت انجام شبیه‌سازی نشان داده شده است. در اطراف کوله، شبکه‌بندی ریزتری جهت رسیدن به دقت بالاتر در نظر گرفته شده است.

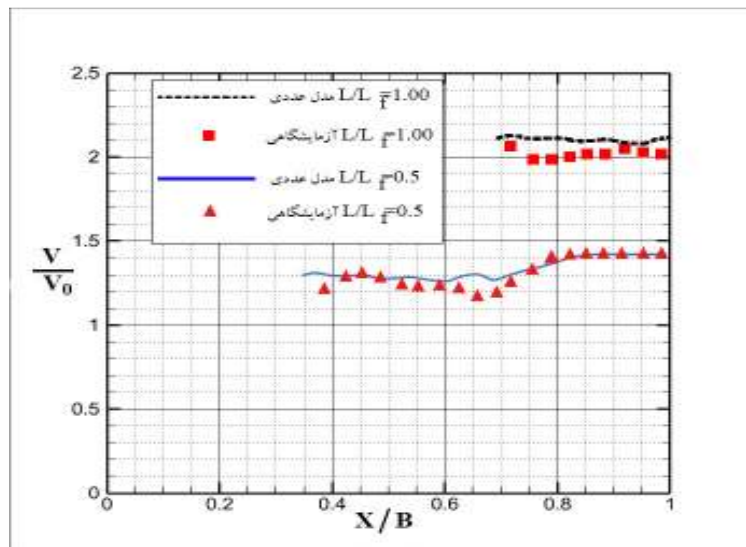
طول خاکریز شیب‌دار (L) در دو حالت $1/22$ متر و $2/44$ متر در نظر گرفته شده است. خاکریزهای دسترسی در فاصله $7/43$ متری از بالادست قرار گرفته‌اند و طول کلی کانال نیز $17/68$ متر است. بستر سیلاب‌دشت $0/15$ متر بالاتر از بستر کانال اصلی قرار دارد و میزان دبی $0/3$ متر مکعب بر ثانیه بود. مدل مذکور در نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی گردید. شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست به ترتیب، دبی و فشار



شکل ۳. نمایی از شبکه‌بندی دامنه حل مدل آزمایشگاهی مورالس و اتما

فاصله اندازه‌گیری شده در امتداد مقطع، و B نصف عرض کانال است.

شکل (۴) نتایج مدل عددی را با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌کند، که در آن سرعت میانگین عمق، V_0 سرعت میانگین عمق در جریان نزدیک‌شونده،



شکل ۴. مقایسه نتایج مدل عددی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در مقطع عبوری از محور خاکریز

آزمایشگاهی با استفاده از رابطه‌ی جذر میانگین مربع خطاها (رابطه‌ی ۷) تعیین شده است.

در ادامه و به منظور ارزیابی مقدارهای به‌دست‌آمده از مدل عددی، میزان خطای محاسبه‌ی سرعت‌های طولی متوسط‌گیری‌شده عمقی به روش عددی با مدل‌های

$$RMSE = 100 \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i^{Exp} - V_i^{Num})^2} \quad (7)$$

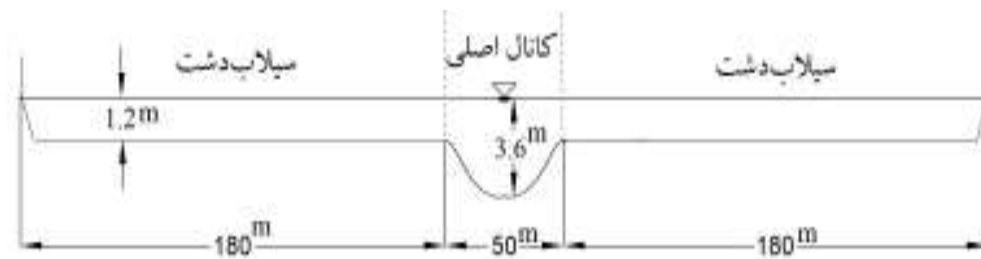
۴/۳ درصد و ۷/۱ درصد بوده است، که این محدوده خطا بین مدل‌سازی عددی و مدل‌سازی آزمایشگاهی قابل قبول است.

در رابطه فوق V_i^{Exp} مقادیر آزمایشگاهی، V_i^{Num} مقادیر عددی و N تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار خطا در حالت‌های مختلف طول کوله ۱/۲۲ متر و ۲/۴ متر به ترتیب در حدود

۲-۳- مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل

شیب دیواره‌های کانال جهت سازگاری بیشتر با طبیعت، ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. عرض سیلاب‌دشت و کانال اصلی به ترتیب برابر با ۱۸۰ و ۵۰ متر است. طول کانال برابر ۲۰۰۰ متر، شیب کف کانال برابر ۰/۰۰۱۵ و ضریب زبری مانینگ سیلاب‌دشت و کانال اصلی به ترتیب برابر با ۰/۰۳ و ۰/۰۲۵ لحاظ گردید. دبی ورودی کانال برابر ۱۱۰۰ متر مکعب بر ثانیه است و عمق آب در کانال اصلی و سیلاب‌دشت به ترتیب ۳/۶ و ۱/۲ متر می‌باشد.

در این تحقیق بررسی الگوی جریان در اطراف خاکریز دسترسی با نسبت پیشروی‌های متقارن و نامتقارن در سیلاب‌دشت کانال مرکب مد نظر بوده است. کانال مرکب متقارن که مقطع عرضی آن در شکل (۵) آمده است، مورد استفاده قرار گرفته است. مقطع در بخش سیلاب‌دشت‌ها بدلیل متغیر بودن نسبت پیشروی و تمرکز بر نتایج خروجی بر اساس فرضیه مطرح‌شده، به صورت مسطح (بدون تو رفتگی و برآمدگی‌های طبیعی) در نظر گرفته شده است.

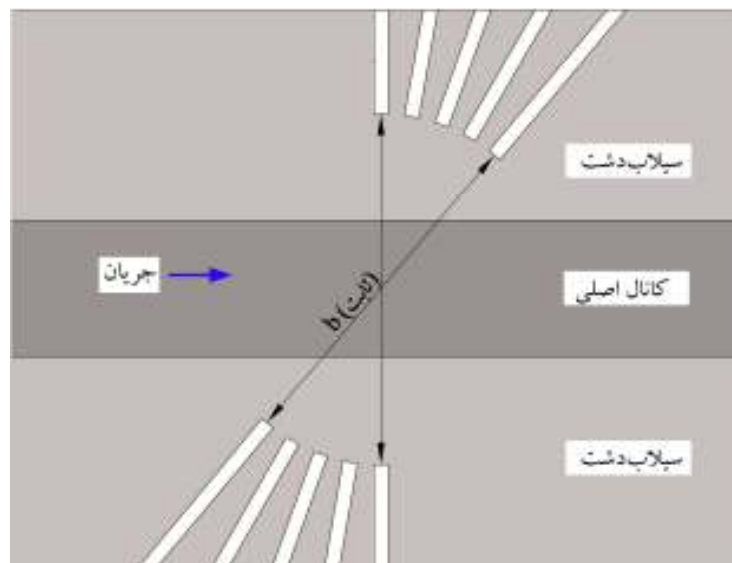


شکل ۵. مقطع عرضی کانال

۲-۴- مدل سازی جریان

است. به منظور ثابت ماندن عملیات پل سازی مورد نیاز (طول پل ثابت و برابر ۲۳۰ متر فرض شده است)، فاصله بازشوی بین کوله‌ها در تمام زوایای بیه یکسان است.

در ابتدا جهت بی بعد کردن نتایج حاصل از آزمون‌ها، یک مدل بدون پل به عنوان مدل پایه شبیه سازی گردیده است. مدل سازی‌ها در ۵ در زاویه بیه مختلف خاکریز دسترسی برای زوایای ۰، ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه مطابق شکل (۶) انجام شده

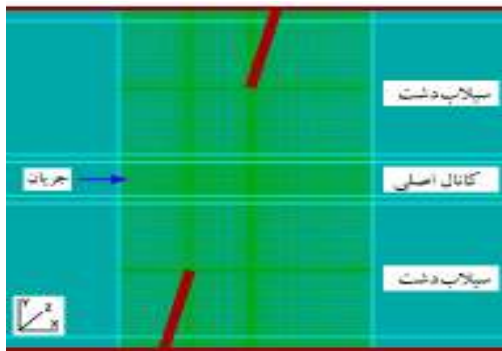


شکل ۶. پلان شماتیک کانال با زوایای بیه ۰، ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه

جریان شروع شده و تا ۱۵۰ متر پایین دست خاکریز شکافنده جریان ادامه می‌یابد و عرض آن مطابق عرض شبکه اول است. بدیهی است که ابعاد شبکه دوم ریزتر از ابعاد شبکه اول است. ابعاد شبکه دوم در هنگام رسیدن به انتهای خاکریزها در سیلاب دشت جهت دقت بیشتر در نتایج ریزتر انتخاب شده است.

در شکل (۷) نمایی از شبکه بندی صورت گرفته برای زاویه بیه ۱۵ درجه (به عنوان نمونه) ارائه شده است.

برای مدل سازی عددی، ابتدا هندسه مدل مطابق با ابعاد مدل فیزیکی به صورت سه بعدی در نرم افزار اتوکد ترسیم و با فرمت STL خروجی گرفته شد و سپس در مدل FLOW-3D فراخوان گردید. پس از بررسی‌های مختلف، در هر آزمون دو شبکه تودرتو جهت مش بندی در نظر گرفته شده است. شبکه اول مربوط به کل میدان محاسباتی می باشد که طول آن معادل طول کل کانال (۲۰۰۰ متر) و عرض آن نیز معادل عرض کانال (۴۱۰ متر) می باشد. شبکه دوم در راستای طولی از ۱۰۰ متر بالادست خاکریز هدایت کننده



شکل ۷. شبکه‌بندی مدل برای زاویه بیه ۱۵ درجه

شده‌اند. برای فرمول‌بندی انتقال مومنتوم از روش منقطع‌سازی مرتبه اول استفاده گردیده و معادلات تنش برشی به صورت صریح و فشار به صورت ضمنی کمترین باقیمانده تعمیم یافته حل شده‌اند. همچنین در قسمت خروجی، گزینه‌های سرعت سیال، اطلاعات هیدرولیکی و تنش برشی جهت ارایه نتایج انتخاب شده‌اند.

پیش از اجرای شبیه‌سازی، برخی تنظیمات برای مدل انجام شده است. از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ برای شبیه‌سازی این مدل استفاده شده است. شرط مرزی دبی با ارتفاع آب مربوطه در مرز ورودی دامنه (بالادست) اعمال شده است. در ناحیه خروجی (پایین دست) شرط مرزی فشار ثابت انتخاب شده است. شرط مرزی تقارن برای ناحیه فوقانی مدل و شرط مرزی دیواره نیز در کف دامنه و دیواره‌های آن معرفی

۳- نتایج و بحث

۳-۱- پیشروی متقارن خاکریزهای دسترسی

هدایت آب عمل می‌کند و شرایط جریان را برای انتقال به دهانه پل با افزایش زاویه بیه بهتر خواهد کرد.

با افزایش زاویه بیه پل از صفر تا ۱۵ درجه، حداکثر سرعت و تنش برشی در اطراف خاکریزهای شکافنده جریان افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش زاویه بیه پل از ۱۵ تا ۳۵ درجه، حداکثر سرعت و تنش برشی روند کاهشی دارد. این امر را می‌توان ناشی از تشکیل یک ناحیه چرخشی مرده جریان در بالادست خاکریزهای شکافنده جریان دانست که می‌تواند همچون یک دیوار هدایت آب، موجب تسهیل عبور جریان آب شود. با توجه به نتایج نشان داده شده، در هنگام عبور جریان از خاکریز هدایت‌کننده، شرایط هیدرولیکی بهتری نسبت به عبور جریان از خاکریز شکافنده برقرار است. از این رو با در نظر گرفتن فاصله‌ی ثابت بازسوی بین خاکریزها (طول پل ثابت است)، می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که با افزایش نسبت پیشروی خاکریز هدایت‌کننده

با توجه به توضیحات ارایه شده در بخش قبلی، مدل‌های اشاره شده در بخش ۲-۴ شبیه‌سازی گردیده است. سپس مقادیر بیشینه سرعت و تنش برشی در اطراف خاکریزهای دسترسی استخراج شده است. در شکل (۸)، نمودارهای بی‌بعد شده حداکثر سرعت و تنش برشی، برای نسبت پیشروی ۵۰ درصد و زوایای بیه ۰، ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه ارایه شده است.

در شکل (۸)، U_{max} حداکثر سرعت جریان در اطراف کوله، U_{max0} حداکثر سرعت جریان در مدل پایه، τ_{max} حداکثر تنش برشی در اطراف کوله، τ_{max0} حداکثر تنش برشی در مدل پایه می‌باشند.

در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب)، با افزایش زاویه بیه پل از صفر تا ۳۵ درجه، حداکثر سرعت و تنش برشی در اطراف خاکریز هدایت‌کننده جریان روند کاهشی دارد. می‌توان چنین استنتاج کرد که خاکریز مسیر راه به صورت یک دیوار

فرضیات این تحقیق، ناگزیر طول خاکریز هدایت کننده افزایش می‌یابد. جهت بررسی این فرضیه، زاویه بیه ۱۵ درجه که دارای بیشترین سرعت و تنش برشی (بدترین عملکرد هیدرولیکی) در میان زوایای بیه مختلف است، با پیشروی‌های نامتقارن خاکریزهای دسترسی و ثابت بودن فاصله‌ی بازشوی بین خاکریزها مدل‌سازی شده است.

جریان و کاهش نسبت پیشروی خاکریز شکافنده جریان، شرایط هیدرولیکی کل مقطع بهبود خواهد یافت. به بیان دیگر، در مواردی که شرایط هیدرولیکی در اطراف خاکریز شکافنده نامساعد است با کم کردن طول خاکریز شکافنده، مانع ایجاد شده در برابر جریان کم اثر شده و جریان راحت تر از محل پل عبور می‌کند. با توجه به ثابت بودن طول پل در



(ب)



(الف)

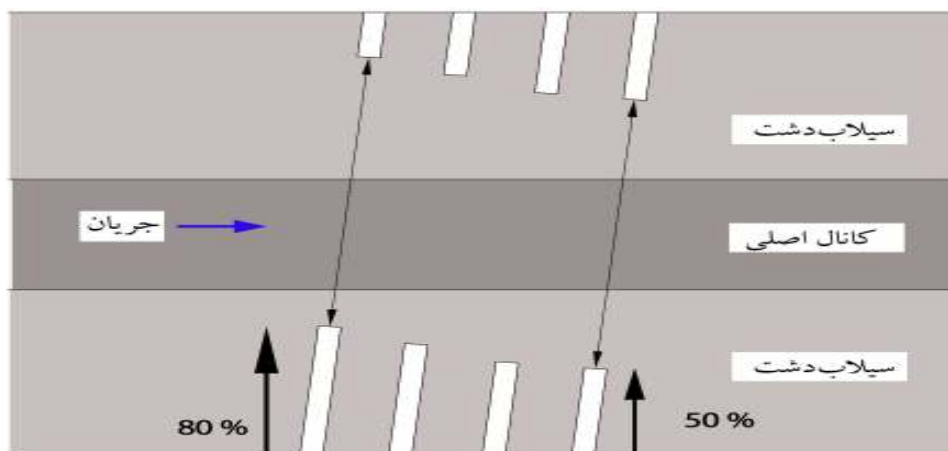
شکل ۸. نمودار تغییرات سرعت و تنش برشی در زوایای مختلف بیه

الف) نمودار حداکثر سرعت در اطراف خاکریزها ب) نمودار حداکثر تنش برشی در اطراف خاکریزها

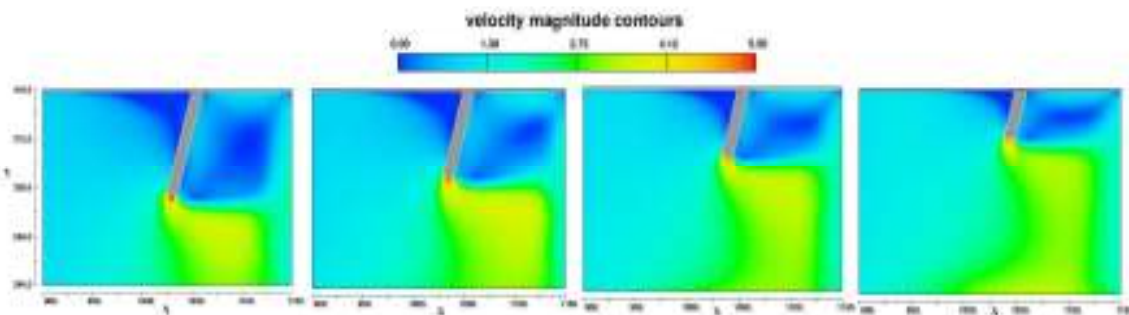
۳-۲- پیشروی نامتقارن خاکریزهای دسترسی

بیشینه سرعت و تنش برشی در اطراف خاکریزهای دسترسی استخراج شده است. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱)، پلان توزیع سرعت در سیلاب‌دشت به ترتیب برای خاکریزهای شکافنده و هدایت‌کننده جریان در زاویه بیه ۱۵ درجه برای پیشروی‌های مختلف در نرم‌افزار نشان شده است.

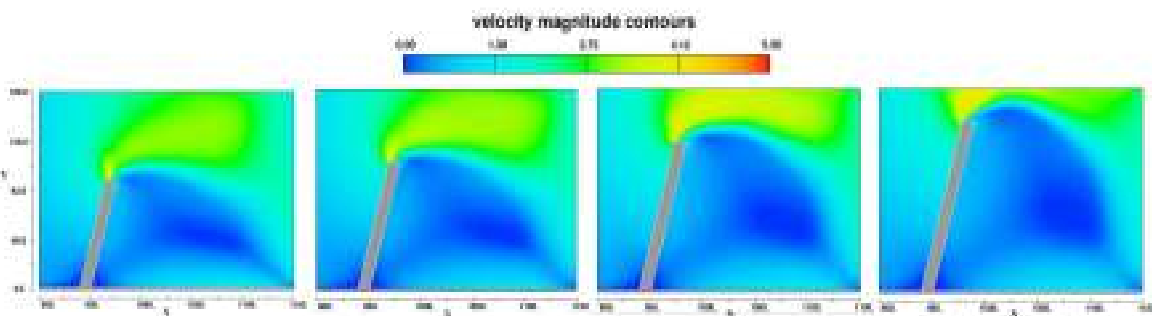
در این بخش مدل‌ها با پیشروی‌های نامتقارن خاکریز دسترسی در زاویه بیه ۱۵ درجه شبیه‌سازی گردیده است. با ثابت بودن فاصله ثابت بازشوی بین خاکریزها، خاکریز هدایت‌کننده جریان با نسبت پیشروی ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد مطابق شکل (۹) مدل‌سازی شده است. سپس مقادیر



شکل ۹. پلان شماتیک پیشروی خاکریز هدایت‌کننده جریان در کانال با فرض ثابت بودن فاصله‌ی بازشوی بین دو خاکریز



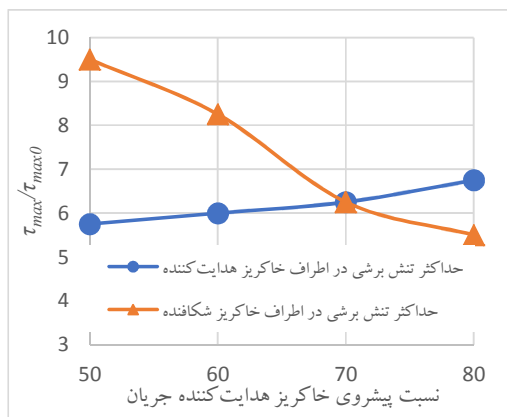
شکل ۱۰. پلان توزیع سرعت برای خاکریز شکافنده جریان در زاویه بیه ۱۵ درجه برای پیشروی‌های مختلف



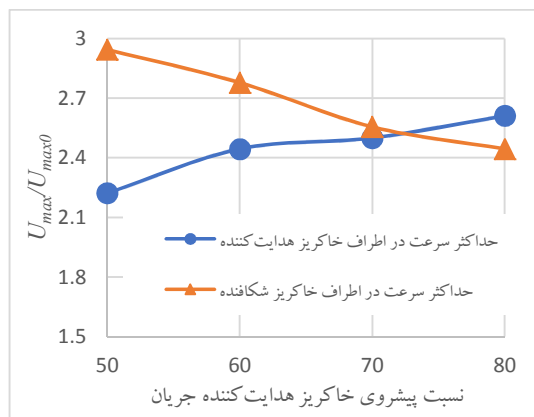
شکل ۱۱. پلان توزیع سرعت برای خاکریز هدایت‌کننده جریان در زاویه بیه ۱۵ درجه برای پیشروی‌های مختلف

درصد خاکریز هدایت‌کننده جریان، مقادیر حداکثر سرعت و تنش برشی در اطراف دو خاکریز به نقطه‌ی بهینه خود رسیده است. در این حالت حداکثر سرعت و تنش برشی نسبت به حالت پیشروی متقارن ۵۰ درصد، به ترتیب ۱۴ و ۳۵ درصد در کل مقطع کاهش یافته است. پیشروی بیشتر خاکریز هدایت‌کننده جریان باعث بحرانی‌تر شدن شرایط در اطراف این خاکریز نسبت به خاکریز شکافنده جریان شده است.

در شکل (۱۲) نمودارهای بی‌بعد شده حداکثر سرعت و تنش برشی، برای نسبت‌های پیشروی ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ درصد خاکریز هدایت‌کننده جریان و زاویه بیه ۱۵ درجه ارایه شده است. در شکل‌های (۱۲-الف) و (۱۲-ب)، با افزایش نسبت پیشروی خاکریز هدایت‌کننده جریان از ۵۰ تا ۸۰ درصد، حداکثر سرعت و تنش برشی در اطراف خاکریز هدایت‌کننده جریان روند افزایشی و در اطراف خاکریز شکافنده جریان روند کاهشی دارد. در نسبت پیشروی ۷۰



(ب)



(الف)

شکل ۱۲. نمودار تغییرات سرعت و تنش برشی برای پیشروی‌های مختلف در زوایای بیه ۱۵ درجه (الف) نمودار حداکثر سرعت در اطراف خاکریزها (ب) نمودار حداکثر تنش برشی در اطراف خاکریزها

۴- نتیجه گیری

خاکریز هدایت‌کننده جریان با افزایش زاویه بیه بهتر از خاکریز شکافنده جریان می‌باشد. جهت بهینه‌سازی الگوی جریان در عبور از محل پل با وجود بیه، مخصوصاً برای خاکریز شکافنده جریان، ایده نامتقارن بودن خاکریزهای هدایت‌کننده و شکافنده با فرض ثابت بودن طول پل بررسی شد. بدین ترتیب هزینه عملیاتی احداث پل تغییری نمی‌کند. نسبت پیشروی بیشتر برای خاکریز هدایت‌کننده جریان در نظر گرفته شد. از این رو طول خاکریز شکافنده کاهش یافته و عملاً اثرگذاری آن بر جریان در مواقعی که بیه پل سبب تشدید پارامترهای هیدرولیکی می‌گردد، کاهش می‌یابد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که پیشروی تا ۷۰ درصد خاکریز هدایت‌کننده جریان در مقطع مورد مطالعه، باعث کاهش حداکثر سرعت جریان تا ۱۴ درصد و کاهش حداکثر تنش برشی تا ۳۵ درصد در کل مقطع می‌شود که هم می‌تواند شرایط بهینه در اطراف هر دو خاکریز ایجاد کند و هم به تبع آن سبب کاهش پتانسیل آبشستگی و در نهایت کم شدن احتمال آسیب به پل گردد.

در این تحقیق شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان اطراف خاکریزهای دسترسی پل بیه‌دار با پیشروی‌های متقارن و نامتقارن در یک کانال مرکب به منظور بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان پیرامون این خاکریزها مدنظر بوده است. مدل‌سازی جریان در پنج زاویه بیه مختلف (صفر، ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه) انجام شد. نتایج نشان داد که در اطراف خاکریز هدایت‌کننده جریان، پارامترهای هیدرولیکی با افزایش زاویه بیه روند کاهشی دارد، حتی می‌توان چنین استنباط کرد که خاکریز مسیر راه به صورت یک دیوار هدایت آب عمل می‌کند و شرایط جریان را برای انتقال به دهانه پل با افزایش زاویه بیه بهتر خواهد کرد. در اطراف خاکریز شکافنده جریان قدری پیچیده‌تر است. تا زاویه بیه ۱۵ درجه شرایط وخیم هیدرولیکی تشدید شده و بر خلاف انتظار در زوایای بیه بالاتر از ۱۵ درجه، پارامترهای هیدرولیکی روند کاهشی دارد، که این امر را می‌توان ناشی از تشکیل یک ناحیه چرخشی مرده جریان در بالادست خاکریزهای شکافنده جریان دانست که می‌تواند همچون یک دیوار هدایت آب مجازی، موجب تسهیل عبور جریان آب شود. همچنین در مجموع، عملکرد

۵- مراجع

Crossing”, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Vol. 6, No. 3, pp. 475-489.

-Fernandes, J. N., Leal, J. B. & Cardoso, A. H., (2015), “Assessment of stage-discharge predictors for compound open-channels”, Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 45, pp. 62-67.

-Fernandes, J. N., Leal, J. B. and Cardoso, A. H., (2012), “Flow Structure in A Compound Channel with Smooth and Rough Floodplains”, European Water, Vol. 38, No. 1, pp. 3-12.

-Flow Science, Inc., (2008), “FLOW-3D User’s Manual (Version 9.3)”, Flow Science, Inc., Santa Fe, N.M.

-صمدی رحیم، ع. یونسی، ح.ا. شاهی نژاد، ب. ترابی پوده، ح. (۱۴۰۰)، “مطالعه آزمایشگاهی اثر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت بر روی هیدرولیک جریان در کانال‌های مرکب واگرا”، نشریه هیدرولیک، ۱۶(۱)، ص. ۱۱۱-۱۳۰.

-کریمی، س. و زراتی، ا.ر.، (۱۳۹۲)، “مدل‌سازی عددی آب‌شستگی در محل تنگ‌شدگی کوله پل”، نشریه هیدرولیک، ۸(۲)، ص. ۷۵-۸۸.

-هاشمی‌کیا، س. و عباسپور، ا. حسین زاده دلیر، ع. و فرسادی زاده، د.، (۱۳۹۶)، “مطالعه آزمایشگاهی تنش برشی و سرعت جریان در کانال مرکب”، دومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و مدیریت بحران، تهران.

-Erduran, K. S., Seckin, G., Kocaman, S. and Atabay, S., (2012), “3D Numerical Modelling of Flow Around Skewed Bridge

- Tang, X., (2017), "An Improved Method for Predicting Discharge of Homogeneous Compound Channels Based on Energy Concept", *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 57, pp. 57-63.
- Thomason, C., (2019), "Hydraulic Design Manual", Texas Department of Transportation.
- Vui Chua, K., Fraga, B., Stoesser, T., Ho Hong, S. and Sturm, T., (2019), "Effect of Bridge Abutment Length on Turbulence Structure and Flow Through the Opening", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 145, No. 6, pp. 04019024.
- Wardhana, K., and Hadipriono, F. C., (2003), "Analysis of Recent Bridge Failures in the United States", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 17, No. 3, pp. 151-158.
- Yang, Y., Melville, B. W., Macky, G. H. and Shamseldin, A. Y., (2019), "Local Scour at Complex Bridge Piers in Close Proximity under Clear-Water and Live-Bed Flow Regime" *Water*, Vol. 11, No. 8, pp. 1530.
- Kouchakzadeh, S. and Townsend, R. D., (1997), "Maximum Scour Depth at Bridge Abutments Terminating in the Floodplain Zone", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 996-1006.
- Mahjoob, A. and Kilanehei, F., (2020), "Effects of the Skew Angle and Road Embankment Length on the Hydraulic Performance of Bridges on Compound Channels", *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, Vol. 62, No. 4, pp. 44-54.
- Morales, R. and Ettema, R., (2013), "Insights from Depth-Averaged Numerical Simulation of Flow at Bridge Abutments in Compound Channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 139, No. 5, pp. 470-481.
- Seckin, G., (2007), "The Effect of Skewness on Bridge Backwater Prediction", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34, No. 10, pp. 1371-1374.
- Shahhosseini, M. and Yu, G., (2019), "Experimental Study on the Effects of Pier Shape and Skew Angle on Pier Scour", *Journal of Physics: Conf. Ser.*, Vol. 1300, pp. 012031.
- Smith, H. D. and Foster, D. L., (2005), "Modeling of Flow around A Cylinder over A Scoured Bed", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 131, No. 1, pp. 14-24.

The Effect of Asymmetric Approach Embankments of Skewed Bridges on Flow

Mahdi Asadi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

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

Fouad Kilanehei, Associate Professor, Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

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

Received: July 2022- Accepted: November 2022

ABSTRACT

At the bridge section, usually to reduce the length of the bridge deck for economic and constructional issues, a part of the river floodplain is blocked by the road embankment. This causes a reduction in the flow cross-section and changes the hydraulic conditions. As the velocity gradient increases in the narrowed section, the shear stress on the riverbed also increases. Increased shear stress can cause erosion in the riverbed and around the embankment and the abutments, exposing the bridge to hydraulic damage. On the other hand, sometimes the direction of the bridge axis is not perpendicular to the flow, which is called a skewed bridge. Depending on their location in the flow path and performance, the embankments in these bridges may be called flow-guiding or flow-splitting embankments. In this paper, the effect of symmetric and asymmetric encroachment of the embankments of the skewed bridge in the floodplain on hydraulic flow conditions is investigated. To improve the hydraulic conditions of the flow around the flow-splitting embankments, the asymmetric encroachment of the approach embankments has been proposed and investigated. For this purpose, three-dimensional numerical modeling of flow was performed. First, the numerical model was evaluated based on the results of existing laboratory studies. Then, the effects of symmetrical encroachment of approach embankments at different skew angles were evaluated, and after that, the asymmetric encroachment of approach embankments to reduce shear stress at the bridge section was proposed and investigated. The results show that the 70% encroachment of the flow-guiding embankment at the critical skew angle, regarding the constant flow cross-section, reduces the maximum velocity and bed shear stress by 14% and 35% in the studied bridge section, respectively.

Keywords: Approach embankment, Flow pattern, Numerical Simulation, Scour, Skewed Bridge