

Numerical Investigation of the Opening of River Bridges Change and Skew on Flow Structure and Afflux: Three-Dimensional Versus One-Dimensional Approaches

Amir Mahjoob^{1*} , Fouad Kilanehei² and Kheirollah Khademi¹

(Received: July 14-2025 ; Revised: August 18-2025 ; Accepted: September 21-2025)

1. Transportation Research Institute, Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

*: Corresponding author Email: a.mahjoob@bhrc.ac.ir

Abstract

One of the most significant hydraulic issues in determining the opening of river bridges is the lack of flow choking due to a reduction in the width of the flood passage. In this paper, determining the required opening for flow passage at a bridge location has been investigated using the concept of specific energy, one-dimensional, and three-dimensional flow modeling. First, the maximum encroachment of the embankments on the sides of the bridge in the river has been determined in such a way that it does not change the flow situation upstream of the bridge, using the concept of specific energy. The dimensions obtained for the bridge opening have been simulated numerically in two one-dimensional and three-dimensional models, and the flow condition at the bridge site and upstream has been evaluated and compared. The results showed that the one-dimensional numerical model predicts, on average, 67 percent higher amount of afflux than the three-dimensional model, while the maximum shear stress obtained from the one-dimensional model is, on average, 33 percent lower than that of the three-dimensional model. The effect of the bridge skewness on the amount of afflux and other hydraulic parameters of the flow, including bed shear stress and maximum velocity, has also been investigated using a three-dimensional model. The afflux was obtained at a 19.2 percent of normal depth at a skew of 40 degrees.

Keywords: Contracted channel section, River bridges, One-dimensional and three-dimensional flow modeling, Skewed bridges, Bed shear stress

How to cite this article: Mahjoob, A., Kilanehei, F. and Khademi, K. 2025. Numerical Investigation of the Opening of River Bridges Change and Skew on Flow Structure and Afflux: Three-Dimensional Versus One-Dimensional Approaches. *J. Water and Soil Sci.* 29(4): 42-61. DOI: [10.47176/jwss.29.4.71741](https://doi.org/10.47176/jwss.29.4.71741)

Copyright © 2025 Mahjoob et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

بررسی عددی اثر تغییر مقدار بازشدگی پل‌های رودخانه‌ای و بیه بر ساختار جریان و برگشت آب: رویکرد یک‌بعدی و سه‌بعدی

امیر محبوب^{۱*} , فواد کیلانته‌ئی^۲ و خیراله خادمی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۵/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۳۰)

۱. پژوهشکده حمل و نقل، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: a.mahjoob@bhrc.ac.ir

چکیده

یکی از مواردی که در تعیین بازشدگی پل‌های رودخانه‌ای دارای اهمیت زیادی است، عدم انسداد جریان در اثر کاهش مقطع عبوری سیلاب است. در این مقاله تعیین بازشدگی مورد نیاز برای عبور جریان رودخانه در محل پل با استفاده از مفهوم انرژی مخصوص و مدل‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی جریان بررسی شده است. ابتدا با استفاده از مفهوم انرژی مخصوص، بیشینه پیش‌آمدگی خاکریزهای طرفین پل در رودخانه به‌گونه‌ای تعیین شد که باعث تغییر وضعیت جریان آب در بالادست پل نشود. ابعاد به‌دست‌آمده برای بازشدگی پل، به صورت عددی و در دو حالت یک‌بعدی و سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و وضعیت جریان در محل پل و بالادست آن ارزیابی و مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل عددی یک‌بعدی مقدار برگشت آب را به طور متوسط ۶۷ درصد بیشتر از مدل سه‌بعدی پیش‌بینی می‌کند. این درحالی است که بیشینه تنش برشی به‌دست‌آمده از مدل یک‌بعدی به طور متوسط ۳۳ درصد کمتر از مدل سه‌بعدی است. اثر بیه پل بر مقدار برگشت آب و سایر متغیرهای هیدرولیکی جریان از جمله تنش برشی بستر و سرعت بیشینه با استفاده از مدل سه‌بعدی نیز بررسی شده است. در حالت بیه ۴۰ درجه مقدار افزایش عمق آب، ۱۹/۲ درصد مقدار عمق نرمال به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: تنگنای موضعی، پل‌های رودخانه‌ای، مدل‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی جریان، پل‌های بیه، تنش برشی بستر

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

در چند دهه اخیر، کشور ما در مناطق مختلف با سیلاب‌های بزرگی مواجه بوده است. سیلاب دی‌ماه سال ۱۳۸۳ در جنوب و جنوب شرق کشور و سیلاب اسفندماه سال ۱۳۹۷ و فروردین‌ماه سال ۱۳۹۸ که در استان‌های غربی، مرکزی و شمالی رخ داد، نمونه‌ای از سیلاب‌های سنگین و با خسارت زیاد به شمار می‌آیند. از آنجایی که شبکه راه‌ها و ابنیه فنی مرتبط با آن به طور معمول در برابر سیلاب قرار می‌گیرند، خسارت وارده به آنها بسیار زیاد است. مطالعات هیدرولوژی و هیدرولیک، از بخش‌های بسیار مهم و حیاتی در مطالعات راه، راه‌آهن و ابنیه فنی مرتبط، به‌ویژه پل‌های بزرگ است. نگاهی به عوامل خرابی پل‌ها نشان می‌دهد که بیشترین عامل خرابی در پل‌های بزرگ، ناشی از تخمین نادرست دبی سیلاب و مسائل هیدرولیکی است. بر اساس مطالعاتی که نتایج آن در یکی از نشریات انجمن مهندسين عمران ایالات متحده ارائه شده است، بیش از پنجاه درصد از خرابی پل‌ها در این کشور به دلیل مسائل هیدرولیکی و هیدرولوژیک روی داده است (۲۸).

در این میان تعیین بازشدگی مورد نیاز برای عبور جریان رودخانه در محل پل کار ساده‌ای نیست. بازشدگی پل به سطحی از مقطع رودخانه در محل پل اطلاق می‌شود که امکان عبور جریان از آن فراهم است. به عبارت دیگر فضای بین پایه‌های میانی و کناری پل که جریان از آن عبور می‌کند، بازشدگی پل گویند. آسیب ناشی از سیلاب و یا افزایش دائمی سطح آب بالادست را می‌توان نشانه ناکافی بودن بازشدگی پل دانست. اگر میزان بازشدگی پل کافی نباشد، با افزایش سرعت جریان در محل پل، مصالح بستر رودخانه به آسانی شسته شده و موجبات فرسایش بستر را فراهم می‌آورد. به طور کلی پل‌های قدیمی‌تر بیشتر تحت تأثیر این مشکل قرار می‌گیرند. تعیین بازشدگی مورد نیاز برای عبور جریان بستگی زیادی به دوره بازگشت سیلاب طراحی در نظر گرفته شده دارد. اگر بازشدگی کمتر از حد مورد نیاز باشد، می‌تواند باعث شکست پل شده و

اگر بیشتر از حد نیاز باشد، موجب غیر اقتصادی شدن پل می‌شود.

به طور معمول برای ساخت پل‌های رودخانه‌ای (به ویژه در مواردی که عرض رودخانه زیاد است)، بخشی از عرض رودخانه در طرفین آن با خاکریز مسدود شده و ساخت سازه پل فقط در ناحیه میانی رودخانه انجام می‌شود. بدین ترتیب با کوتاه‌شدن طول پل، هزینه و مدت‌زمان اجرای ساخت پل کاهش می‌یابد؛ اما مقطع عرضی رودخانه جهت عبور جریان نیز به مقدار قابل توجهی محدود شده و الگوی جریان در محل پل به طور محسوسی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (۲۱ و ۲۲). خطوط جریان با نزدیک شدن به کوله‌ها (پایه‌های کناری پل (Abutments)) و پایه‌های میانی پل، آرایش خود را تغییر داده و به تبعیت از ساختار هندسی، نوع سازه و سایر مشخصات فنی مربوطه، الگوهای متفاوتی از جریان را به خود می‌گیرند (۱۰ و ۱۴). تعیین بازشدگی پل‌های رودخانه‌ای از جمله مواردی است که مورد توجه بسیاری از مهندسين مشاور و پیمانکاران حوزه راه‌سازی است. یکی از مواردی که در تعیین بازشدگی پل‌های رودخانه‌ای به لحاظ هیدرولیکی دارای اهمیت زیادی است، عدم وقوع انسداد و گرفتگی جریان در اثر کاهش عرض مقطع عبوری جریان است. به عبارت دیگر، بیشینه پیشروی خاکریزهای طرفین پل در داخل مقطع رودخانه باید به اندازه‌ای باشد که برگشت آب در بالادست مقطع پل مشاهده نشود. همچنین با قرار گرفتن خاکریزها و کوله‌ها در مسیر جریان‌های رودخانه‌ای، تغییراتی در الگوی جریان به وجود می‌آید که عموماً باعث افزایش ظرفیت انتقال رسوب و آبستگي موضعی در اطراف آنها می‌شود (۲۶). از طرف دیگر در مواردی که بر طبق طرح هندسی راه، راستای محور پل بر راستای محور طولی رودخانه عمود نباشد، شرایط جریان عبوری از محل پل پیچیده‌تر خواهد شد. زاویه بین راستای محور پل و خط عمود بر جریان را زاویه بیه پل (Skew Angle) می‌نامند. زاویه بیه پل نیز می‌تواند به عنوان یک متغیر بر ساختار جریان و مقدار برگشت آب موثر باشد.

با توجه به اهمیت شناخت الگوی جریان در محل پل ها و تعیین مقدار برگشت آب، مطالعات تحلیلی، مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات عددی متعددی به صورت یک بعدی، دوبعدی در پلان و سه بعدی در این زمینه انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است. از آنجایی که از نظر هیدرولیکی، وضعیت جریان در اطراف خاکریزهای احداث شده در رودخانه، بسیار شبیه به جریان در اطراف آبشکن ها است؛ بنابراین در این قسمت، مرور ادبیات فنی در خصوص آبشکن ها نیز انجام شده است.

مولیناس و حافظ (۲۰۰۰) یک مدل دوبعدی اجزای محدود را برای شبیه سازی جریان اطراف کوله های قائم توسعه دادند. آنها اثرهای نسبت پیش آمدگی، زبری بستر، عمق جریان، شدت جریان و شیب انرژی را در میدان جریان بررسی کردند (۲۰). اولین و دارتوس (۱۹۹۷) یک مدل سه بعدی را برای بررسی جریان در اطراف آبشکن توسعه دادند و با داده های آزمایشگاهی مقایسه کردند (۲۳). کیمورا و هوسودا (۲۰۰۳) مدلی سه بعدی به منظور شبیه سازی جریان اطراف موانع موجود در جریان را توسعه دادند. این پژوهشگران از مدل $k-\epsilon$ غیرخطی برای مدل سازی آشفتگی استفاده کردند. آنها معادلات حاکم را با استفاده از روش حجم محدود روی یک شبکه با ساختار جابه جاشده منقطع کردند و از روش کوئیک برای حل عبارات انتقال و روش تفاضل مرکزی برای عبارات پخش استفاده کردند (۱۱). کیو و ژانگ (۲۰۰۵) مدلی سه بعدی برای شبیه سازی جریان آشفته و رسوب در اطراف آبشکن ها ارائه کردند. در این مدل علاوه بر مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و تابع دیوار، روش VOF برای شبیه سازی سطح آزاد آب استفاده شد (۴). زولین و همکاران (۲۰۰۶) شبیه سازی گردابه های بزرگ را برای مدل سازی سه بعدی جریان اطراف آبشکن های غیر مستغرق به کار بردند. این پژوهشگران از روش حجم محدود برای منقطع سازی معادلات ناویر-استوکس روی شبکه جابه جاشده استفاده کردند و الگوریتم سیمپل سی را برای حل آن به کار بردند (۲۹). مک کوی و همکاران (۲۰۰۸) جریان اطراف میدان

آبشکن های غیر مستغرق واقع در یک کانال مستقیم را با استفاده از شبیه سازی گردابه های بزرگ به صورت سه بعدی مدل سازی کردند. این پژوهشگران روش حجم محدود و گام جزئی را برای منقطع سازی معادلات ناویر-استوکس روی شبکه بدون ساختار ترکیبی به کار بردند (۱۸). یزدی و همکاران (۲۰۱۰) الگوی جریان اطراف آبشکن را با استفاده از نرم افزار FLUENT به صورت سه بعدی بررسی کردند. ایشان از مدل آشفتگی $k-\omega$ و روش VOF برای مدل سازی آشفتگی و سطح آزاد آب استفاده کردند (۳۰). کوکمان و همکاران (۲۰۱۰)، اردوران و همکاران (۲۰۱۲) و کوکمان (۲۰۱۴) به بررسی کارایی مدل FLOW3D برای تعیین نیمرخ سطح آب در محل پل های رودخانه ای واقع در کانال مرکب، پل های بیه و برای حالت های مختلف بازشدگی پل پرداختند (۱۳، ۶ و ۱۲). مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی FLOW3D با نتایج مدل آزمایشگاهی نشان داد که مدل عددی از دقت مناسبی برخوردار است. محبوب و کیلانتهئی (۲۰۲۰) با کاربرد یک مدل سه بعدی، اثرات زاویه بیه و طول خاکریز دسترسی جاده بر عملکرد هیدرولیکی پل های واقع در کانال های مرکب را بررسی کردند (۱۶). حاجی عمو عصار و همکاران (۲۰۲۱) یک روش تجربی ساده برای محاسبه برگشت آب برای شکل های مختلف پل و مقادیر مختلف زاویه بیه در کانال های مرکب پیشنهاد دادند. مقایسه نتایج روش پیشنهادی و روش انرژی، همبستگی خوبی را نشان داد. همچنین این پژوهشگران نتایج روش پیشنهادی را با نتایج داده های تجربی برای پل های بدون بیه و پل های بیه با زوایای ۳۰ درجه و ۴۵ درجه ارزیابی کرده و دقت آن را تأیید کردند (۹). صفائی و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از تحلیل عددی سه بعدی به بررسی تنش برشی بستر و اختلاف اندازه حرکت بین سیلاب دشت و کانال اصلی در یک کانال مرکب ذوزنقه ای متقارن با استفاده از نرم افزار FLOW3D پرداختند. این پژوهشگران پس از تأیید صحت عملکرد مدل یادشده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود، تنش برشی بستر و اختلاف اندازه حرکت بین سیلاب دشت و کانال اصلی برای

که در مسیر جریان‌های رودخانه‌ای قرار می‌گیرند، تعیین مقدار بازشدگی مناسب است که علاوه بر تأمین ظرفیت لازم برای عبور سیلاب طراحی، از لحاظ اقتصادی و هزینه اجرا نیز مطلوب ارزیابی شود. در این پژوهش ابتدا با استفاده از مفهوم انرژی مخصوص، بیشینه پیش‌آمدگی خاکریزهای طرفین پل در رودخانه به‌گونه‌ای تعیین شده است که باعث تغییر وضعیت جریان آب در بالادست پل نشود. در ادامه ابعاد به‌دست‌آمده برای بازشدگی پل (از معادله انرژی و کاربرد انرژی مخصوص)، به صورت عددی در دو حالت یک‌بعدی و سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و وضعیت جریان در محل پل و بالادست آن ارزیابی و مورد مقایسه قرار گرفته است. اثر بیه پل بر مقدار برگشت آب و سایر متغیرهای هیدرولیکی جریان از جمله تنش برشی بستر و سرعت بیشینه با استفاده از مدل سه‌بعدی نیز بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

در این قسمت مروری بر وضعیت جریان در عبور از یک تنگ‌شدگی انجام شده و در ادامه به منظور بررسی برگشت آب در تنگ‌شدگی‌های مختلف، مشخصات هندسی و هیدرولیکی برای یک رودخانه فرضی ارائه شده است. به‌منظور تحلیل جریان، معادلات حاکم در حالت سه‌بعدی و یک‌بعدی بیان شده و نرم‌افزار یک‌بعدی HEC-RAS و همچنین نرم‌افزار سه‌بعدی FLOW3D (به همراه صحت‌سنجی عملکرد نرم‌افزار) معرفی شده‌اند.

مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل مورد بررسی

از جمله موارد کاربرد معادله انرژی، تحلیل جریان در حالت تغییر عرض کانال است. چنانچه عرض یک کانال را که در آن دبی ثابتی برقرار است، به تدریج تنگ‌تر کرده و کاهش داده شود، برای تعیین عمق جریان در محل تنگنای موضعی می‌توان از معادله انرژی و مفهوم انرژی مخصوص استفاده کرد. با فرض مقطع مستطیلی، صرف نظر از افت انرژی در محل تبدیل و

طول‌های مختلف تکیه‌گاه پل و در حالت‌های با و بدون دیوار هدایت بیضوی شکل را بررسی کردند (۲۵). اسدی و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D و به‌صورت سه‌بعدی، هندسه‌های مختلف خاکریز دسترسی و دیوارهای هدایت آب در پل‌های رودخانه‌ای قرارگرفته در کانال‌های مرکب را مدل‌سازی کردند و اثرهای آنها را بر الگوی جریان و مقادیر تنش برشی بستر بررسی کردند (۲). حاجی عمو عصار و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی روش‌های مختلف محاسبه برگشت آب در کانال‌های باز مانند روش‌های یک‌بعدی تا چند بعدی، رویکردهای تفاضل محدود و روش‌های هوش مصنوعی پرداختند. تمرکز اصلی این پژوهشگران بر ارائه مزایا، معایب و عملکرد روش‌های یک‌بعدی قرار داشت و نتیجه‌گیری کردند که روش WSPRO به طور قابل‌توجهی مقادیر برگشت آب را دست بالا و روش یارنل دست پایین تخمین می‌زند (۸). بهمن‌پور و همکاران (۲۰۲۴) توزیع سرعت و دبی را در پل‌های رودخانه‌ای با استفاده از نظریه آتروپی تخمین زدند. نظریه آتروپی را از دیدگاه احتمالاتی توضیح دادند و داده‌های ورودی مدل آتروپی شامل عمق‌سنجی مقطع عرضی و سرعت سطحی ارائه‌شده توسط شبیه‌سازی‌های عددی را مرور کردند. نتایج نشان داد که مدل آتروپی می‌تواند به‌طور قابل‌اعتمادی در بالادست پل و حتی در حالتی که با تنها یک مقدار (یعنی بیشترین مقدار) سرعت سطحی اعمال شود، به کار گرفت (۳). لازارین و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از یک مدل سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی به تحلیل جریان در محل یک پل تمام مقیاس و چندپایه، واقع بر رودخانه طبیعی پرداختند. از روش حجم سیال برای تخمین تراز سطح آزاد آب و از روش DES (Detached Eddy Simulation) برای حل گردابه‌های آشفته که از نظر انرژی در جریان مهم هستند، استفاده شد. در این شبیه‌سازی جریان سطح آزاد و جریان تحت فشار بررسی شد. نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر پل و همچنین تنش برشی بستر مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفتند (۱۴).

همان‌گونه که اشاره شد، از جمله مسائل مهم در طراحی پل‌هایی

می‌شود. چنانچه طول بازشدگی از مقدار یادشده کمتر در نظر گرفته شود، وضعیت انسداد پیش آمده و در بالادست پل، افزایش عمق و برگشت آب دیده خواهد شد. در بخش مدل سازی عددی، طول رودخانه برابر با ۳ کیلومتر و محل پل در فاصله ۱ کیلومتری از پایین دست جانمایی شده است. به منظور کاهش افت انرژی در محل پل، تغییرات عرض رودخانه و کاهش آن باید به صورت تدریجی انجام شود؛ بنابراین یک خاکریز خطی به صورت متقارن در بالادست و پایین دست پل مطابق شکل (شکل ۷ - بیه صفر درجه) با نسبت سه برابر طول خاکریزهای طرفین لحاظ شده است.

معادلات حاکم بر میدان جریان در حالت سه بعدی و یک بعدی

در حالت کلی معادلات حاکم بر حرکت سیال شامل معادله ناویر-استوکس و معادله بقای جرم هستند. معادلات ناویر-استوکس که همان معادلات بقای اندازه حرکت هستند، ارتباط بین تغییرات سرعت و فشار را در سیال بیان می‌کنند. معادلات یادشده به شکل معادلات ۱ و ۲ هستند (۳۰):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p - \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

معادله ۱، معادله بقای جرم و معادله ۲، معادله اندازه حرکت است. در این معادلات، $\vec{v}$ بردار سرعت، ρ چگالی سیال، p فشار، $\vec{g}$ بردار گرانش، $\mu = \mu_0 + \mu_1$ به طوری که μ_0 لزجت سیال و μ_1 لزجت آشفتگی است و $\vec{F}$ نیروی بدنه‌ای است.

با انتگرال گیری از معادلات سه بعدی جریان در مقطع عرضی رودخانه و در نظر گرفتن فرضیاتی، معادلات یک بعدی جریان به دست می‌آید. در معادلات یک بعدی جریان در رودخانه از معادلات جریان متغیر تدریجی غیردائمی که به معادلات سنت-ونانت مشهور است، استفاده می‌شود. معادله ۳ معادله پیوستگی و معادله ۴ معادله اندازه حرکت در حالت یک بعدی است (۱۵).

برقراری جریان زیر بحرانی در بالادست تنگنا، تحلیل جریان با استفاده منحنی انرژی مخصوص (E) - عمق (h) مبین کاهش عمق در محل تنگنا خواهد بود (۱).

هرگاه کاهش عرض به گونه‌ای باشد که انرژی مخصوص در بالادست تنگنا کمتر از کمترین انرژی مخصوص در محل تنگنا باشد، در این حالت وضعیت انسداد پیش می‌آید و انرژی مخصوص در ابتدای تنگنا به اندازه‌ای افزایش پیدا خواهد کرد که عبور جریان از مقطع تنگنا با کمترین انرژی مخصوص مقطع تنگنا ممکن شود و این کار با افزایش عمق و برگشت آب در بالادست انجام می‌شود (۱). در هر نقطه از بالادست پل، به میزان افزایش عمق آب در حالت وجود پل نسبت به حالت عدم وجود پل، برگشت آب (Backwater یا Afflux) گفته می‌شود.

همان گونه که پیش از این نیز عنوان شد، در پروژه‌های راه سازی بنا به دلایل اقتصادی و افزایش سرعت اجرا، به طور معمول، طول بازشدگی پل های رودخانه‌ای کمتر از عرض رودخانه در محل پل در نظر گرفته می‌شود. با عنایت به اینکه در بیشتر شرایط، وضعیت جریان در رودخانه زیر بحرانی است، یکی از معیارها برای تعیین بازشدگی پل، عدم ایجاد حالت انسداد و برگشت آب در بالادست پل است. به عبارت دیگر بیشینه پیش آمدگی خاکریزهای طرفین پل در رودخانه را باید به گونه‌ای تعیین کرد که باعث تغییر وضعیت جریان آب در بالادست پل نشود.

در این پژوهش، به عنوان نمونه رودخانه‌ای با مقطع مستطیلی به عرض ۱۰۰ متر، شیب طولی ۰/۰۰۱، ضریب زبری مانینگ برابر با ۰/۰۳ و دبی ۴۷۰ مترمکعب بر ثانیه فرض شده است. در این شرایط مفروض، عمق نرمال برابر با ۲/۵ متر و عدد فرود جریان برابر با ۰/۳۸ تعیین می‌شود. با فرض یک راه اصلی به صورت رفت و برگشت، عرض پل نیز برابر با ۲۲ متر انتخاب شده است. با عنایت به مطالب یادشده، کمترین طول بازشدگی پل بر اساس انرژی مخصوص در بالادست پل $(E=2/68m)$ و با فرض عدم افت انرژی برابر با ۶۲/۸ محاسبه

حالت‌هایی که نیمرخ سطح آب به سرعت تغییر می‌کند، استفاده می‌شود. اثرهای موانع مختلف مانند پل‌ها، آبروها و سازه‌های موجود در پهنه سیلاب‌گیرها را می‌توان در محاسبات منظور کرد. گفتنی است مدل قابلیت‌هایی برای تعیین تغییرات نیمرخ سطح آب در نتیجه ساماندهی کانال و احداث گورها را داراست. به این ترتیب اثر خاکریز پل‌ها در دشت سیلابی را نیز می‌توان با این نرم‌افزار مدل کرد (۲۷). از نرم‌افزار HEC-RAS در مطالعات متعددی از مهندسی رودخانه استفاده شده است که حاکی از عملکرد به نسبت موفق این نرم‌افزار در تحلیل یک‌بعدی جریان است (۱۹).

نرم‌افزار سه‌بعدی FLOW3D

با توجه به پیشرفت تکنولوژی و افزایش قدرت پردازنده‌ها، در دهه‌های اخیر مدل‌های تجاری سه‌بعدی متعددی توسعه و عرضه شده‌اند و دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی جریان‌های با سطح آزاد در طیف گسترده‌ای از سازه‌ها به کار می‌روند. نرم‌افزار FLOW3D یک مدل سه‌بعدی مناسب برای حل مسائل پیچیده دینامیک سیالات است و قادر است دامنه وسیعی از جریان سیالات را مدل کند و نیاز به صرف هزینه و زمان زیاد برای آزمایش‌های فیزیکی را حذف می‌کند (۵). این نرم‌افزار برای مدل‌کردن جریان‌های سطح آزاد سه‌بعدی غیرماندگار با هندسه پیچیده کاربرد فراوانی دارد. در نرم‌افزار یادشده از دو تکنیک روش حجم سیال (VOF) و روش کسر مساحت حجم مانع (FAVOR) برای شبیه‌سازی سطح آزاد سیال و مرزهای هندسی استفاده می‌شود. معادلات حاکم بر سیال با استفاده از روش حجم محدود روی شبکه متناوب حل می‌شود و محیط محاسباتی به شبکه‌ای با سلول‌های مربعی ثابت تقسیم می‌شود. همچنین قابلیت ریزکردن شبکه محاسباتی و همچنین تعریف بلوک‌های متعدد محاسباتی وجود دارد. از جمله مسائل مهم در مدل‌سازی عددی، در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب برای دامنه حل است (۷).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial \zeta}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (4)$$

در معادلات یادشده، x محوری در امتداد طول رودخانه، A سطح مقطع جریان، ζ تراز سطح آب، S_0 شیب کف کانال، S_f شیب خط انرژی و g شتاب ثقل است.

نرم‌افزار یک‌بعدی HEC-RAS

اولین مدل‌های عددی برای حل مسائل مهندسی رودخانه، مدل‌های عددی یک‌بعدی بوده‌اند. این مدل‌ها بر اساس معادلات پیوستگی و اندازه حرکت یک‌بعدی (معادلات شماره ۳ و ۴) که به معادلات سنت-ونانت مشهور است، پایه‌گذاری شده‌اند. بنابراین به فرضیاتی که در استخراج معادلات سنت-ونانت مورد استفاده قرار گرفته است، محدود می‌شوند. علاوه بر این هر کدام از این مدل‌ها نیاز به تعیین ضرایب تجربی مانند ضریب اصطکاک دارند که معمولاً به وسیله کاربر مشخص می‌شود. مدل HEC-RAS که توسط انجمن مهندسين ارتش آمریکا تهیه شده است، شامل سه مولفه تحلیل هیدرولیکی برای محاسبات سطح آزاد آب در حالت جریان دائمی، شبیه‌سازی جریان غیردائمی و محاسبات انتقال رسوب در مرز متحرک است. سه مولفه یادشده از یک نوع نمایش داده‌های هندسی و از روندهای یکسان محاسبات هندسی و هیدرولیکی استفاده می‌کنند. مولفه محاسبه سطح آزاد آب در حالت جریان دائمی، همان‌گونه که از نامش پیداست، برای محاسبه نیمرخ سطح آب در حالت جریان متغیر تدریجی دائمی تهیه شده است. مدل توانایی در نظر گرفتن یک شبکه کامل از کانال‌ها، یک سیستم چند شاخه‌ای یا یک بازه واحد از رودخانه را دارا است. مولفه جریان دائمی قابلیت مدل‌سازی نیمرخ سطح آب در رژیم‌های جریان زیر بحرانی، فوق بحرانی و مختلط را داراست. روند اصلی محاسبات در مدل HEC-RAS بر پایه حل معادلات انرژی یک‌بعدی استوار است. از معادله اندازه حرکت در

ارزیابی مدل سه بعدی

به منظور اطمینان از عملکرد مدل FLOW3D مورد استفاده، نتایج مدل آزمایشگاهی هلتر استفاده می شود. نتایج این آزمایش نیز پیش از این توسط مایرلی و همکاران (۱۹۹۵) برای ارزیابی مدل سه بعدی به کار رفته است (۱۷). آزمایش ها در کانال آزمایشگاهی به طول ۳۲/۴ متر، عرض ۲/۵ متر و با کف سیمانی و دیواره های عمودی صیقلی انجام شده است. آبشکن مکعب شکلی به طول ۲۵ سانتی متر و ضخامت ۵ سانتی متر در امتداد عمود بر محور کانال قرار داده شده است. آزمایش ها برای دبی ۲۰۰ لیتر بر ثانیه و عمق ۲۳ سانتی متر انجام و عدد ضریب زبری مانینگ برابر با ۰/۰۲ گزارش شده است. اندازه گیری سرعت با استفاده از دستگاه اولتراسونیک و در امتداد چند محور انجام شده است. موقعیت نقاط اندازه گیری سرعت در شکل ۱ ارائه شده است.

نتایج و بحث

در این بخش پس از ارائه نتایج ارزیابی مدل سه بعدی و اطمینان از عملکرد مناسب مدل FLOW3D، جریان در حالت یک بعدی و سه بعدی با شرایط هیدرولیکی مندرج در بخش قبل، شبیه سازی و میزان برگشت آب برای سه طول مختلف از بازشدگی پل محاسبه و مقایسه شده است. در ادامه از مدل سه بعدی FLOW3D برای بررسی شرایط جریان در حالت پل بیه دار استفاده شده است.

نتایج ارزیابی مدل سه بعدی

با استفاده از نرم افزار FLOW3D، شرایط هندسی و هیدرولیکی آزمایشگاه یاد شده شبیه سازی شد. در این شبیه سازی، طول و عرض دامنه محاسباتی به ترتیب برابر با ۱۵ و ۲/۵ متر و فاصله آبشکن از مرز بالادست برابر با ۵ متر در نظر گرفته شد. تعداد سلول های محاسباتی در راستای طولی (x)، عرضی (y) و عمقی (z) به ترتیب ۱۰۵، ۵۰ و ۲۱ بوده است. به منظور بیشتر کردن دقت محاسبات در فاصله ۳ تا ۹ متری از بالادست از شبکه بندی

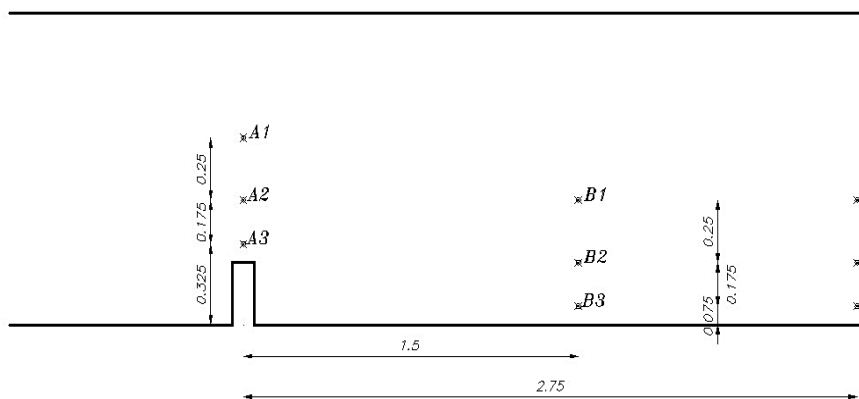
ریزتری استفاده شده است. شرط مرزی بالادست، دبی برابر ۲۰۰ لیتر بر ثانیه لحاظ شد و شرط مرزی پایین دست، تراز سطح آب (در قسمت فشار معین) به گونه ای انتخاب شد که عمق آب برابر ۲۳ سانتی متر شود. شرط مرزی سواحل چپ و راست و کف کانال، از نوع دیواره و شرط مرزی در راستای Zmax از نوع تقارن تعیین شد. شرایط اولیه به گونه ای تعریف شد که در کل میدان محاسباتی عمق آب و سرعت به ترتیب برابر ۲۳ سانتی متر و ۰/۳ متر بر ثانیه باشد. از مدل آشفتگی دو معادله ای k-ε استفاده شد. فرمول بندی با دقت مرتبه اول برای منقطع سازی عبارت انتقال اندازه حرکت به کار گرفته شد. همچنین در شبیه سازی عددی از روش ضمنی و روش باقیمانده کمینه تعمیم یافته GMRES استفاده شد. پس از اجرای مدل تهیه شده در نرم افزار FLOW3D بر اساس موارد یاد شده، نتایج استخراج شد. توزیع عمودی مؤلفه های سرعت طولی (u) و سرعت عرضی (v) در نقاط A1، B1 و C1 با استفاده خروجی های نرم افزار FLOW3D و همچنین نتایج آزمایشگاهی در شکل ۲ ارائه شده و قابل مقایسه است.

برای ارزیابی نتایج به دست آمده از مدل FLOW3D، مقادیر محاسبه شده به صورت عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی با استفاده از جذر متوسط مربع خطاها (RMSE) مقایسه شده است. بدین منظور از معادله ۵ استفاده شد:

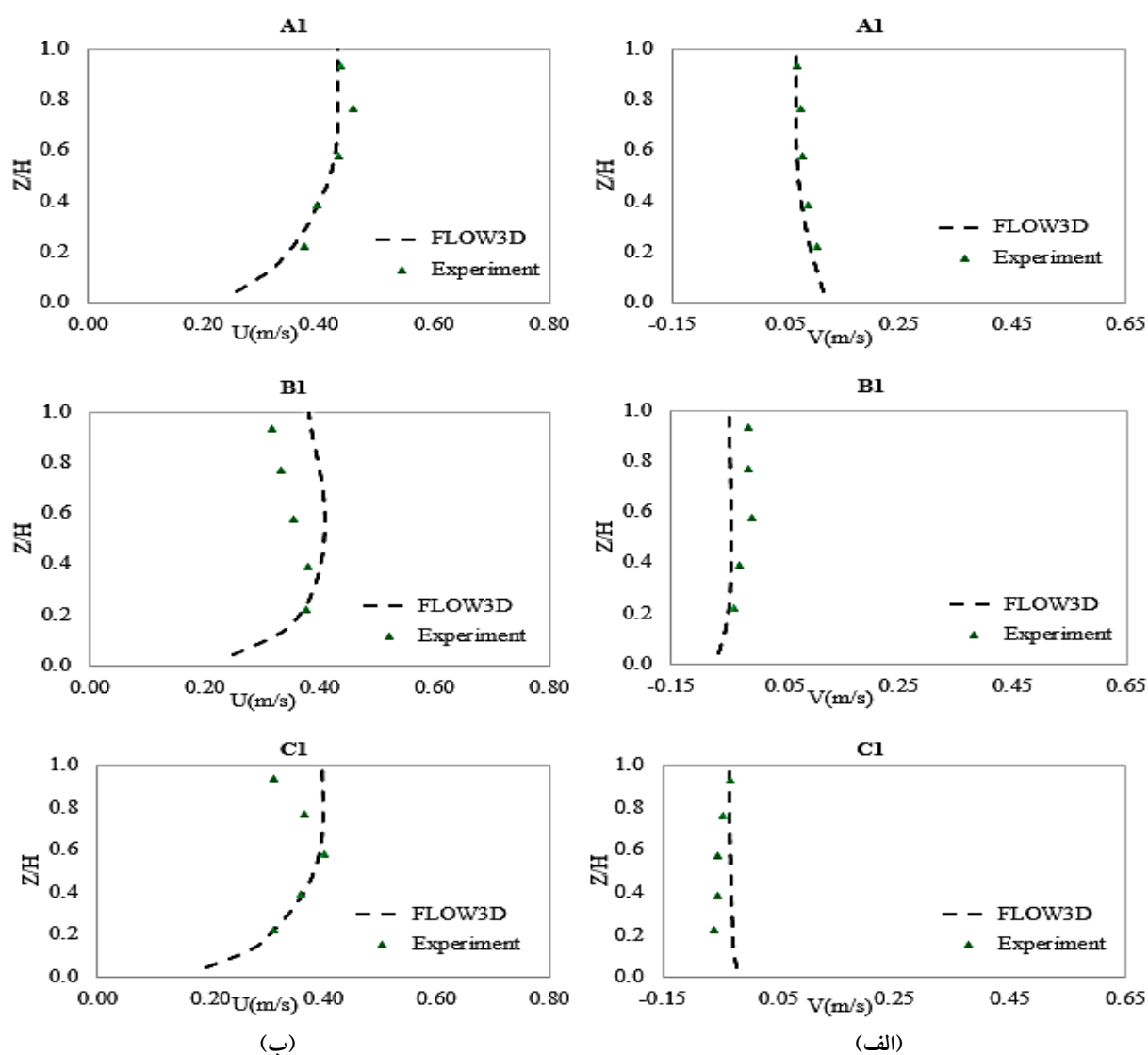
$$RMSE = 100 \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i^{Exp} - V_i^{Num})^2} \quad (5)$$

در این معادله، V_i^{Exp} مقادیر اندازه گیری شده آزمایشگاهی و مقادیر V_i^{Num} مربوط به نتایج مدل عددی است. N نیز تعداد نقاطی است که اطلاعات در آنها وجود دارد.

جذر متوسط مربع خطاها برای مقادیر مؤلفه طولی و عرضی سرعت در جدول ۱ آمده است. با توجه به نتایج جدول ۱ و شکل ۲، می توان دید که مقادیر سرعت های محاسبه شده با استفاده از مدل سه بعدی، تطابق مناسبی با داده های آزمایشگاهی دارند. بدین معنی که مطابق جدول ۱، بیشترین خطای مؤلفه طولی سرعت و مؤلفه عرضی سرعت به ترتیب به ۴/۹۸ درصد



شکل ۱. موقعیت نقاط اندازه‌گیری سرعت در مدل آزمایشگاهی هلنز (متر)



شکل ۲. مقایسه نمودارهای سرعت حاصل از مدل سه‌بعدی FLOW3D (منحنی خط‌چین) با نتایج آزمایشگاهی (دایره توپر) در نقاط A1،

B1 و C1، (الف) سرعت عرضی (v) و (ب) سرعت طولی (u)

جدول ۱. جذر متوسط مربع خطاهای حل عددی جریان اطراف آبشکن غیرمستغرق (درصد)

مؤلفه عرضی سرعت (v)	مؤلفه طولی سرعت (u)	نقطه اندازه گیری
۱/۰۱	۱/۵۹	A1
۲/۹۱	۴/۹۸	B1
۲/۰۲	۴/۱۷	C1

و ۲/۹۱ درصد محدود شده است که در کارهای مهندسی قابل قبول است.

همچنین در شکل ۳ الگوی جریان در پلان حاصل از تحلیل با نرم افزار FLOW3D ارائه شده است. در این شکل، طول ناحیه چرخشی در پایین دست آبشکن به طول آبشکن حدود ۱۱ است. در مطالعه آزمایشگاهی نسبت گفته شده برابر با ۱۱/۵ گزارش شده است که با توجه به عدد به دست آمده از مدل عددی، مقدار خطای نسبی در پیش بینی طول گردابه پایین دست حدود ۴/۵ درصد است.

نتایج ارائه شده در جدول ۱ و شکل های ۲ و ۳ نشان از عملکرد قابل قبول نرم افزار FLOW3D دارد. بعد از اطمینان از عملکرد مناسب نرم افزار FLOW3D، در بخش های بعدی از این نرم افزار به منظور شبیه سازی جریان استفاده شده است.

مقایسه نتایج مدل عددی در حالت سه بعدی و یک بعدی برای

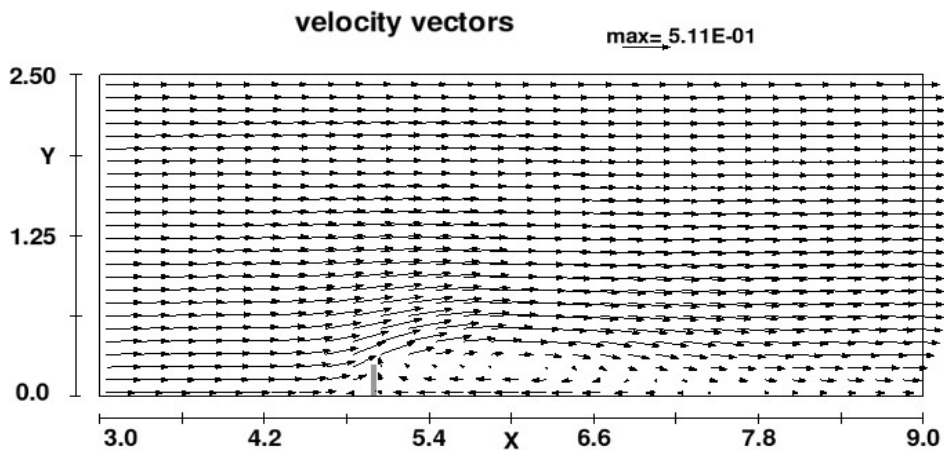
شرایط هندسی و هیدرولیکی مدل مورد بررسی

برای مشخصات هندسی و هیدرولیکی ارائه شده در بخش مواد و روش ها، کمترین طول بازشدگی پل بر اساس انرژی مخصوص در بالادست پل ($E=2/68m$) و با فرض عدم افت انرژی، برابر با ۶۲/۸ متر محاسبه شد. در این بخش بر اساس شرایط هندسی و هیدرولیکی یاد شده در بخش "مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل مورد بررسی"، مدل سازی عددی یک بعدی با استفاده از نرم افزار HEC-RAS و مدل سازی عددی سه بعدی با استفاده از نرم افزار FLOW3D، به ازای طول بازشدگی های مختلف پل (۵۷/۵ متر، ۶۲/۸ متر و ۷۰ متر) انجام شد.

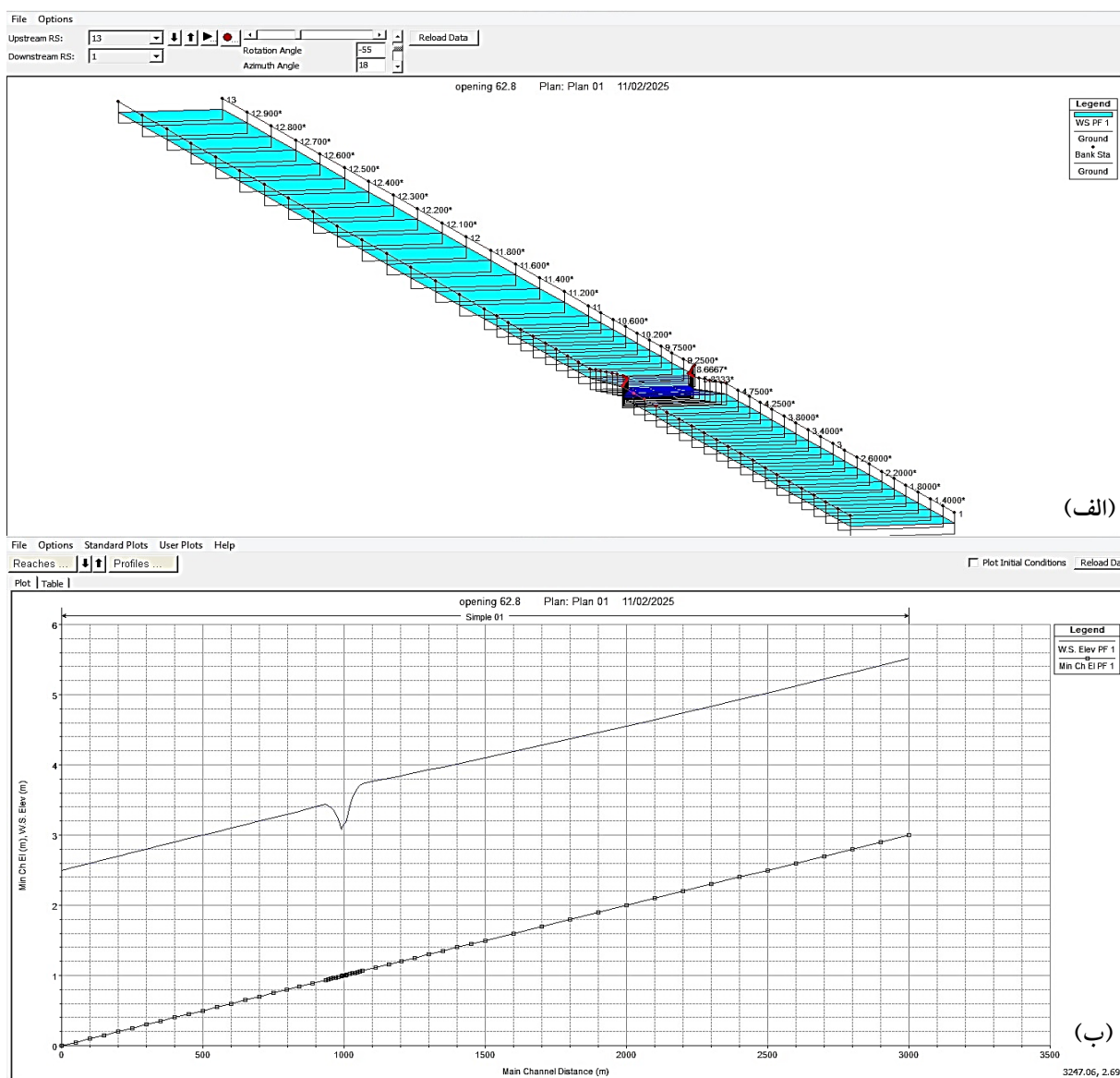
در مدل عددی HEC-RAS در بالادست شرط مرزی دبی و تراز آب و در پایین دست شرط مرزی شیب نرمال اعمال شد. در مدل FLOW3D، شرط مرزی بالادست دبی برابر ۴۷۰ مترمکعب بر ثانیه و شرط مرزی پایین دست تراز سطح آب (در قسمت فشار معین) به گونه ای انتخاب شد که عمق آب برابر ۲/۵ متر شود. شرط مرزی سواحل چپ و راست و کف کانال، از نوع دیواره و شرط مرزی در راستای Zmax از نوع تقارن تعیین شد. شرایط اولیه به گونه ای تعریف شد که در کل میدان محاسباتی عمق آب و سرعت به ترتیب برابر ۲/۵ متر و ۰/۵ متر بر ثانیه باشد. از مدل آشفتگی دو معادله ای k-ε استفاده شد. بقیه موارد مربوط به تنظیمات حل عددی معادلات، مشابه آنچه در قسمت ارزیابی مدل سه بعدی ارائه شد، لحاظ شد.

در شکل ۴ پلان و نیم رخ طولی جریان در رودخانه و محل پل به ازای بازشدگی ۶۲/۸ متر، به دست آمده از مدل HEC-RAS، ارائه شده است. همان گونه که دیده می شود، مدل عددی تغییرات تراز آب در محل پل و برگشت آب در بالادست پل و همچنین نیم رخ جریان متغیر تدریجی شکل گرفته در پایین دست را شبیه سازی کرده است.

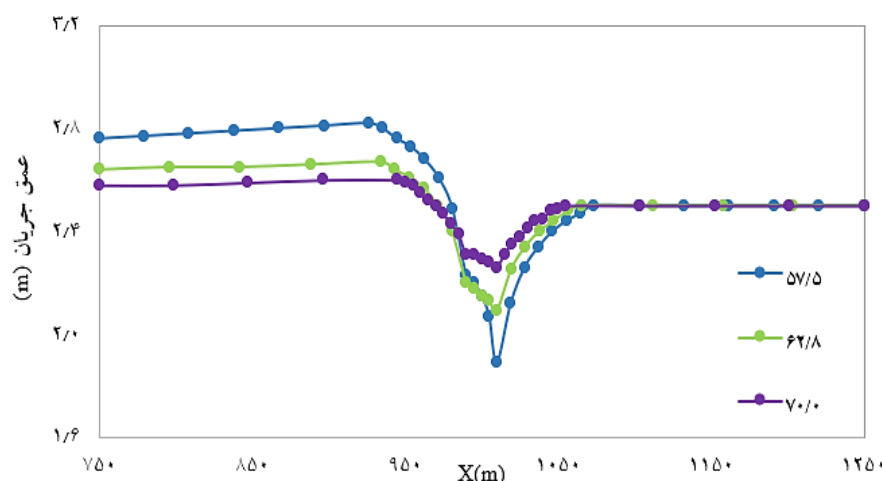
تغییرات تراز آب در مدل یک بعدی HEC-RAS و سه بعدی FLOW3D در راستای خط مرکزی کانال و به ازای طول بازشدگی های ۵۷/۵، ۶۲/۸ و ۷۰ متر به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ ارائه شده است. در شکل های یاد شده، محل پل در نقطه ای با طول $x=1000$ واقع شده است. با توجه به شکل های ۵ و ۶ می توان دید که در نقاطی در بالادست پل، عمق آب از مقدار ۲/۵ متر (عمق نرمال) بیشتر است. به اختلاف عمق آب در هر نقطه با عمق نرمال ۲/۵ متر، برگشت آب گفته می شود. برگشت



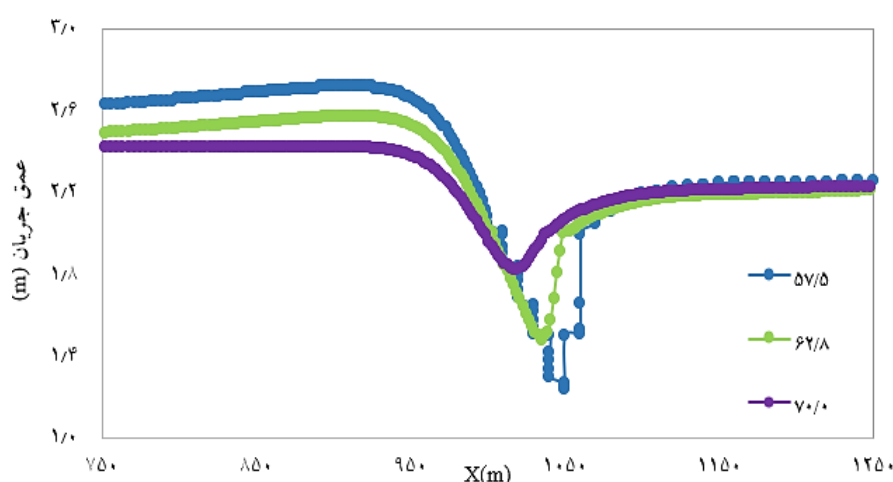
شکل ۳. الگوی جریان اطراف آبشکن در پلان با استفاده از مدل عددی



شکل ۴. نتایج مدل عددی یک بعدی HEC-RAS برای پل به طول ۶۲/۸ متر. (الف) پلان جریان و (ب) نیمرخ طولی جریان



شکل ۵. نیمرخ عمق جریان در امتداد خط مرکزی کانال، مدل عددی HEC-RAS



شکل ۶. نیمرخ عمق جریان در امتداد خط مرکزی کانال، مدل عددی FLOW3D

با توجه به اینکه در تعیین عرض بحرانی از افت انرژی صرف نظر شده است، اختلاف نتایج بین مدل عددی و حل تحلیلی قابل توجه است. نتایج مدل عددی مبین این موضوع است که برای عدم رخداد انسداد، طول بیشتری برای بازشدگی پل از مقدار محاسبه شده تحلیلی مورد نیاز است.

با کاهش طول بازشدگی پل به ۵۷/۵ متر و فشردگی بیشتر جریان در محل پل، مقادیر برگشت آب در هر دو مدل عددی افزایش یافته (مقدار بیشینه ۳۲ سانتی متر در مدل یک بعدی و ۲۲ سانتی متر در مدل سه بعدی) و پرش هیدرولیکی در پایین دست روی داده است. با افزایش طول پل به ۷۰ متر و با

آب در هر دو مدل عددی از روند یکسانی برخوردار بوده؛ ولی مقادیر محاسبه شده توسط مدل یک بعدی از مقادیر مدل سه بعدی بیشتر است. در جدول ۲، مقدار نتایج مدل سازی با FLOW3D و HEC-RAS مربوط به بیشینه برگشت آب در طول های مختلف پل بیان شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده از معادله انرژی و مفهوم انرژی مخصوص، عرض بحرانی (b_c) برابر با ۶۲/۸ متر به دست آمد و به ازای این مقدار بازشدگی برای پل، مقدار برگشت آب نباید وجود داشته باشد؛ اما نتایج هر دو مدل عددی برای این مقدار بازشدگی، برگشت آب در بالادست پل را نشان می دهد.

مدل عددی یک‌بعدی با نتایج سکین و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت بیشتری دارد.

بررسی اثر بیه پل بر هیدرولیک جریان در محل پل

این بخش به بررسی اثر بیه پل بر مقدار برگشت آب و بیشترین مقادیر سرعت و تنش برشی در محل پل اختصاص دارد. بدین منظور مدل‌های مختلفی با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D تهیه شد. در تمامی این مدل‌ها میزان دبی ورودی برابر ۴۷۰ مترمکعب بر ثانیه، تراز آب پایین‌دست برابر ۲/۵ متر، شیب بستر ۰/۰۱، طول پل ۶۲/۸ متر، عرض پل ۲۲ متر، زبری بستر رودخانه ۰/۰۳ و عرض رودخانه ۱۰۰ متر لحاظ شده است. در مدل‌های مختلف زاویه بیه پل تغییر می‌کند. زوایای در نظر گرفته شده برای بیه پل، صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه است.

در بیه صفر درجه با توجه به طول پل و عرض رودخانه، طول خاکریز در جهت عمود بر رودخانه در هر طرف برابر با ۱/۶ متر خواهد بود. با توجه به تجربیات گذشته، برای هدایت جریان عبوری از محل پل، دیواری در نظر گرفته شده است که طول آن در راستای رودخانه، سه برابر طول خاکریز مسیر در بستر رودخانه و برابر ۵۵/۸ متر است (شکل ۷ در حالت بیه صفر درجه).

در مابقی مدل‌ها (بیه‌های ۱۰ تا ۴۰ درجه)، ابتدا راستای مسیر تعیین شده و در قسمت میانی، بازشدگی به اندازه ۶۲/۸ متر به عنوان دهانه پل در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب در همه مدل‌ها، طول پل ثابت است و از تأثیرگذاری طول بازشدگی پل بر متغیرهای جریان جلوگیری شده است. در مدل‌های یادشده برای تعیین طول دیوار هدایت آب بالادست و پایین‌دست در سواحل سمت چپ و راست، بدین ترتیب عمل شده است که ابتدا از گوشه‌های پل (مانند نقطه A در شکل ۷ در حالت بیه ۲۰ درجه) بر ساحل چپ و راست رودخانه عمودی رسم شده (نقطه H در شکل ۷ در حالت بیه ۲۰ درجه) و سپس به اندازه سه برابر طول عمود در جهت بالادست یا پایین‌دست حرکت شده است (نقطه B در شکل ۷ در حالت بیه ۲۰ درجه). دیوار هدایت آب از اتصال نقطه به‌دست‌آمده به گوشه متناظر پل شکل گرفته است. در شکل ۷ پلان رودخانه در محل پل به

توجه به کاهش دبی در واحد عرض در محل پل نسبت حالت پل‌هایی با طول ۶۲/۸ و ۵۷/۵ متر، انتظار می‌رود که برگشت آب در بالادست پل حذف شود که این مهم در مدل سه‌بعدی روی داده است؛ اما مدل یک‌بعدی هنوز مقدار کمی برگشت آب را نشان می‌دهد.

در جدول ۲ علاوه بر مقادیر بیشینه برگشت آب در بالادست پل، بیشترین مقدار عدد فرود و تنش برشی بستر در محدوده سازه پل به ازای مقادیر مختلف طول بازشدگی، حاصل از مدل عددی یک‌بعدی و سه‌بعدی نیز ارائه شده است. مقادیر برگشت آب به‌دست‌آمده از مدل عددی یک‌بعدی به طور متوسط حدود ۶۷ درصد بیشتر از مقادیر به‌دست‌آمده از مدل سه‌بعدی است (در حالت وجود برگشت آب در هر دو مدل عددی). این در حالی است که مقادیر تنش برشی به‌دست‌آمده از مدل سه‌بعدی از مدل یک‌بعدی به طور متوسط ۳۳ درصد بیشتر است.

روش‌های مختلفی برای محاسبه برگشت آب در حالت وجود پل و تنگنا در رودخانه‌ها پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به روش ایزارد، سکین و همکاران (۲۰۰۷)، روش بیری و دلور و سکین و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرد. روابط مورد نیاز برای تعیین مقدار برگشت آب روش‌های یادشده در حاجی عمو عصار و همکاران (۲۰۲۴) آمده است (۸). در جدول ۳ به ازای مقادیر مختلف طول پل، مقادیر برگشت آب حاصل از روش‌های مختلف محاسبه و ارائه شده است.

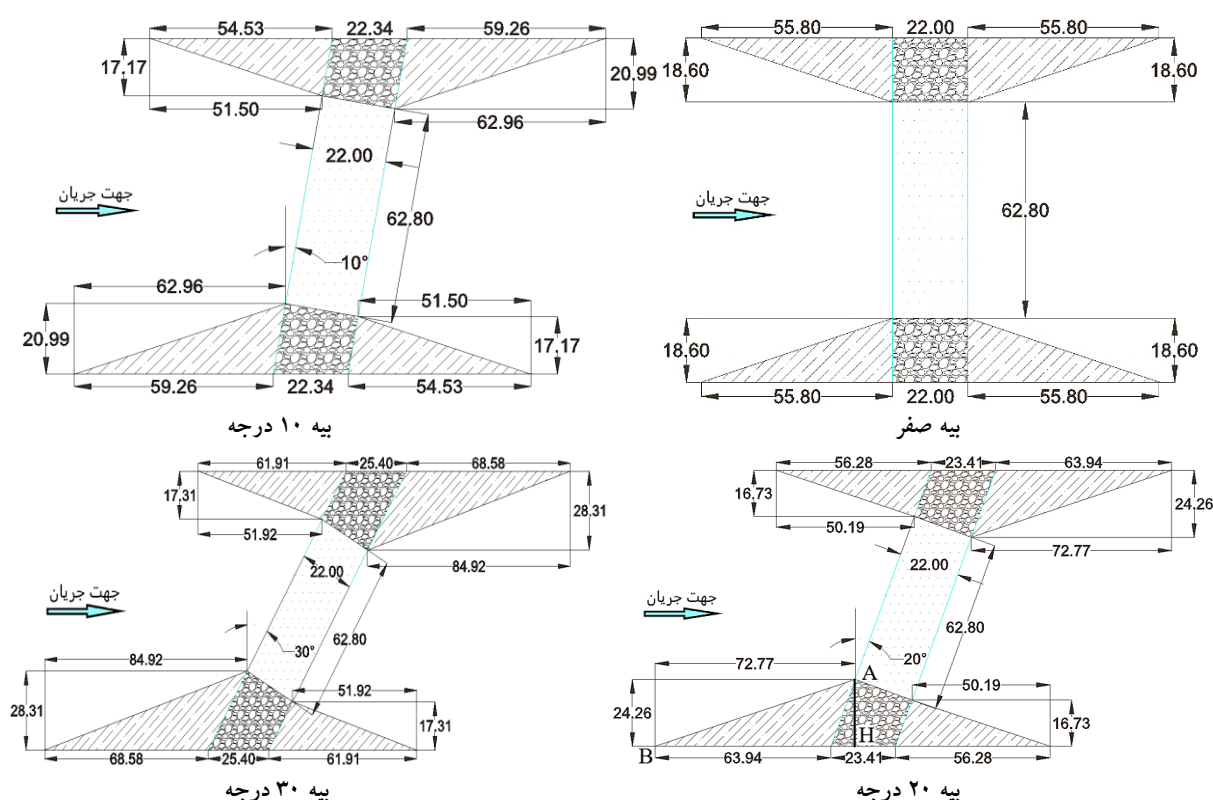
بررسی مقادیر ارائه‌شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که نتایج روش ایزارد با روش بیری و دلور نزدیک به یکدیگر بوده و از نتایج سکین و همکاران (۲۰۰۷) و سکین همکاران (۲۰۰۸) به طور متوسط هشتاد درصد بیشتر است. همچنین مقایسه مقادیر جدول ۳ با نتایج حاصل از مدل عددی یک‌بعدی و سه‌بعدی (جدول ۲) نیز نشان می‌دهد که افزایش مقادیر برگشت آب با کاهش طول پل از روند یکسانی برخوردار بوده و با کاهش طول پل، مقادیر برگشت آب روند صعودی را طی می‌کند. نتایج

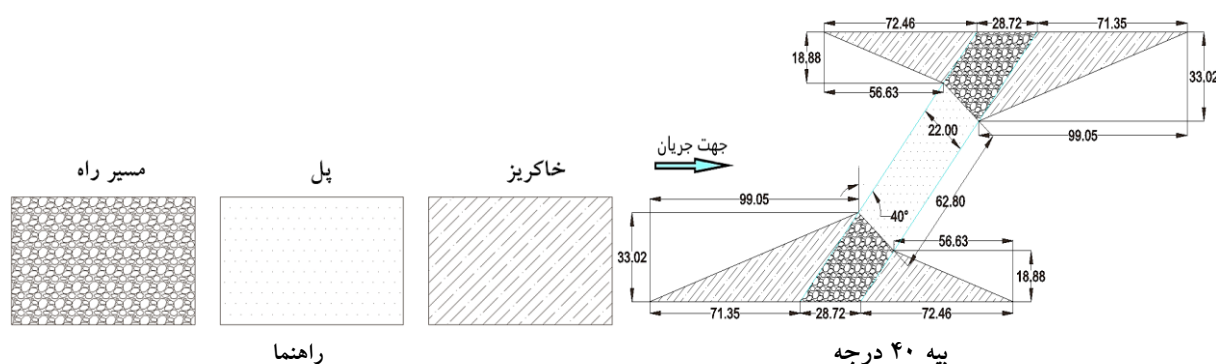
جدول ۲. مقادیر بیشینه برگشت آب، مقدار عدد فرود و تنش برشی بستر به ازای مقادیر مختلف طول پل

طول پل (m)	بیشینه فراآب (m)		بیشینه عدد فرود		بیشینه تنش برشی (Pa)	
	HEC-RAS	FLOW3D	HEC-RAS	FLOW3D	HEC-RAS	FLOW3D
۵۷/۵	۰/۳۲	۰/۲۲	۱	۱/۱۵۷	۱۳۵/۸۶	۱۵۰
۶۲/۸	۰/۱۷	۰/۰۹	۰/۷۹	۱/۰۶۷	۹۰/۱۳	۱۱۱
۷۰	۰/۱۰	۰	۰/۶۳	۰/۹۸۷	۶۰/۳۵	۱۰۰/۴

جدول ۳. مقادیر برگشت آب با استفاده از روابط پیشنهادی توسط پژوهشگران مختلف

طول پل (m)	فراآب (m)			
	روش ایزارد	سکین و همکاران (۲۰۰۷)	روش بیری و دلور	سکین و همکاران (۲۰۰۸)
۵۷/۵	۰/۴۹	۰/۲۸	۰/۴۶	۰/۲۸
۶۲/۸	۰/۴۱	۰/۲۳	۰/۳۸	۰/۲۱
۷۰	۰/۳۳	۰/۱۹	۰/۳۰	۰/۱۴





شکل ۷. هندسه پلان پل با زوایای بیه صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه نسبت به رودخانه

با توجه به شکل ۸، در تمامی مدل‌های ساخته شده به جز منطقه‌ای محدود در نزدیکی کوله سمت راست پل، توزیع تقریباً یکنواختی از عمق جریان در راستای پل دیده می‌شود. این امر نشان می‌دهد که هندسه دیوار هدایت تا حد زیادی توانسته است با وجود عدم تقارن هندسی پل در پلان، به عبور جریان با عمق یکنواخت در عرض پل کمک کند. همچنین این امر سبب می‌شود که ارتفاع پل به لحاظ هیدرولیکی به صورت بهینه انتخاب شود. از دیگر موارد قابل توجه این است که با وجود پیچیدگی هندسه پل و دیوار هدایت آن، گردابه‌های افقی در راستای محور پل تشکیل نشده‌اند و این امر می‌تواند کمک مؤثری در حفظ ایمنی پل در زمان سیلاب باشد.

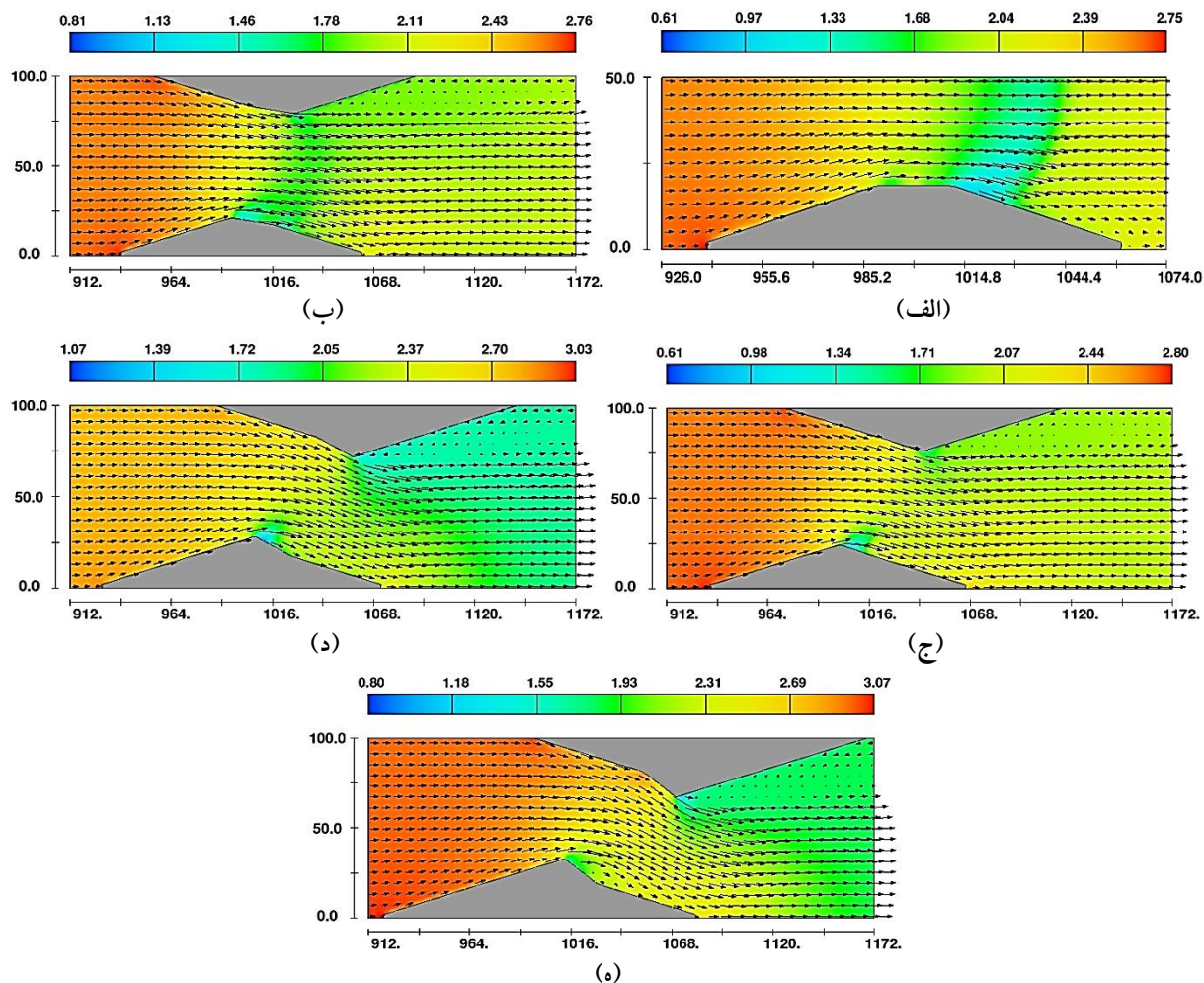
بر اساس نتایج به دست آمده، میزان بیشینه عمق آب در بیه‌های مختلف در محدوده خاکریز و پل، در شکل ۹ رسم شده است (خط ممتد). همان‌طور که در شکل ۹ قابل ملاحظه است، تا بیه ۲۰ درجه تغییر چندانی در بیشینه عمق آب رخ نمی‌دهد؛ اما در بیه‌های ۳۰ و ۴۰ درجه رشدی در میزان بیشینه عمق آب دیده می‌شود. نکته جالب توجه این است که میزان رشد بیشینه عمق آب در شرایطی که بیه ۴۰ درجه است، نسبت به حالتی که بیه صفر است، فقط ۱۱/۶۴ درصد است که رشد چندانی محسوب نمی‌شود. این رشد محدود و توزیع تقریباً یکنواخت عمق جریان در راستای پل، نشان می‌دهد که با وجود افزایش قابل توجه زاویه بیه پل، به دلیل ابعاد هندسه مؤثر دیوار هدایت آب در بالادست و پایین دست پل، جریان با کمترین تغییرات عمق از محل پل عبور می‌کند.

همراه ابعاد خاکریزهای بالادست و پایین دست برای بیه‌های صفر تا ۴۰ درجه نشان داده شده است.

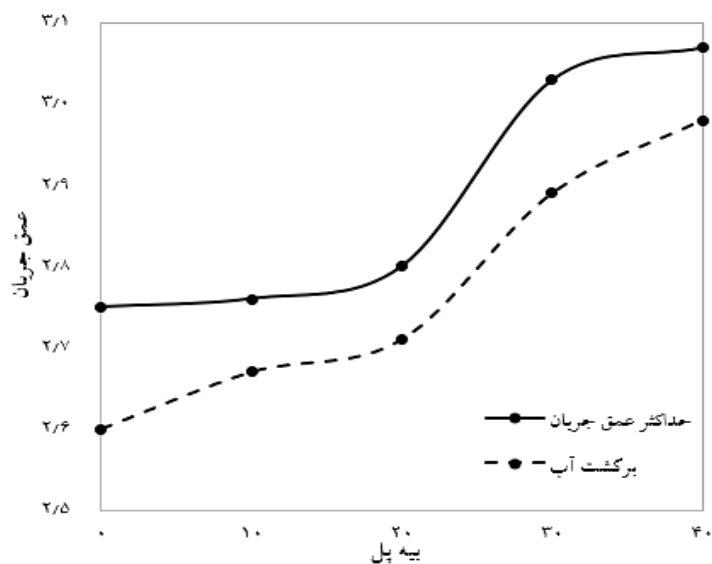
در تمامی مدل‌ها، هندسه پل و خاکریز هدایت جریان به صورت سه بعدی در نرم افزار اتوکد (AutoCAD) رسم شده و در فرمت stl. ذخیره شده و سپس در نرم افزار FLOW3D به عنوان فایل هندسی فراخوانده شده است. شرط مرزی بالادست دبی و شرط مرزی پایین دست تراز سطح آب تعریف شده است. شبکه بندی میدان محاسباتی انجام شده و در محل پل و خاکریز از ابعاد ریزتری برای شبکه بندی استفاده شد. از مدل k-ε دو معادله‌ای به منظور تعیین متغیرهای آشفتگی استفاده شده است (۲۴).

در قسمت تعیین متغیرهای عددی، از روش ضمنی GMRES برای حل معادلات فشار استفاده شده و انتشار اندازه حرکت با دقت مرتبه اول منقطع سازی شده و معادلات اندازه حرکت و پیوستگی حل شده است. بدین ترتیب نتایج با دقت زیاد برای دامنه‌های محاسباتی بزرگ ایجاد می‌شود (۱۲).

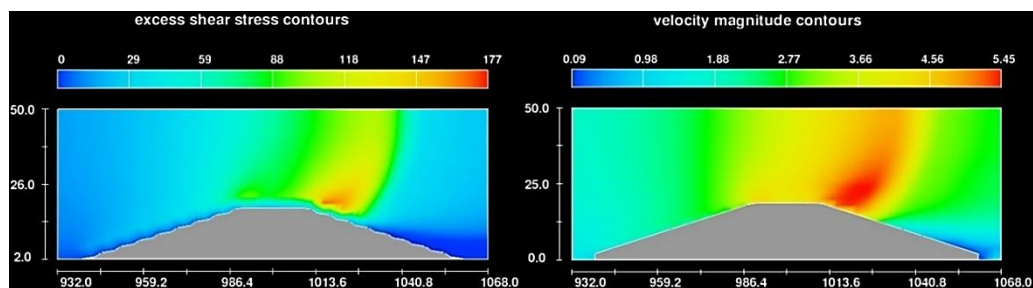
نکته قابل ذکر این است که با توجه به تقارن میدان هندسی و هیدرولیکی در بیه صفر درجه، فقط نیمه سمت ساحل راست رودخانه شبیه سازی شده است و شرط مرزی در میانه رودخانه، شرط تقارن تعیین شده است. در بقیه مدل‌ها (بیه‌های ۱۰ تا ۴۰ درجه)، کل میدان محاسباتی شبیه سازی شده است. پس از اجرای مدل‌ها، خروجی‌های عمق آب در شکل ۸ و بیشترین مقادیر سرعت و تنش برشی در شکل ۱۰ ارائه شده است.



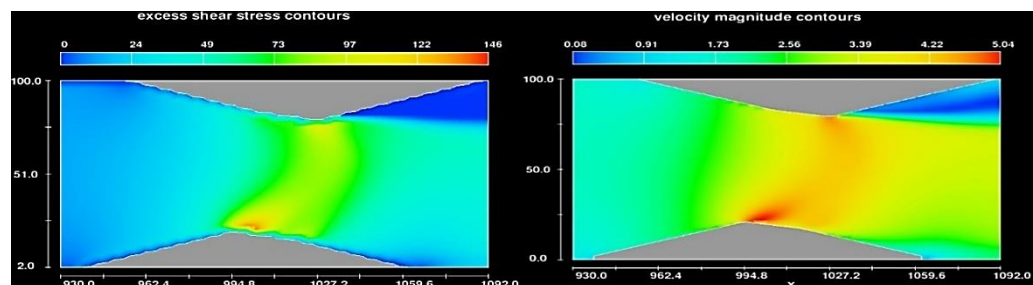
شکل ۸. بردارهای سرعت به همراه نیمرخ عمق آب در محدوده خاکریز و پل در زوایای بیهای (الف) صفر درجه، (ب) ۱۰ درجه، (ج) ۲۰ درجه، (د) ۳۰ درجه و (ه) ۴۰ درجه نسبت به رودخانه



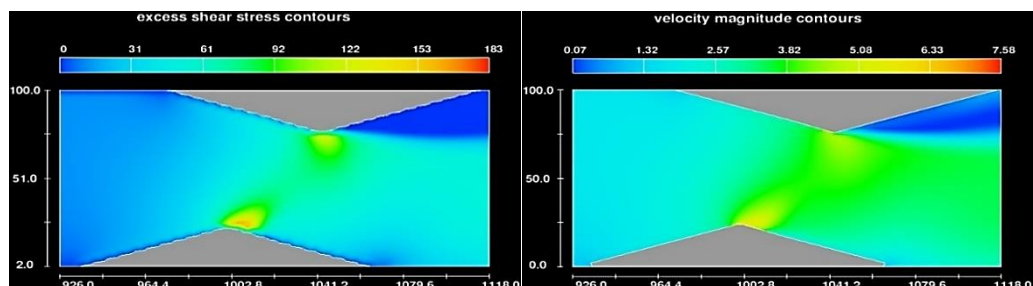
شکل ۹. نمودار بیشینه عمق آب و برگشت آب در محدوده پل و خاکریز نسبت به زاویه بیه پل با رودخانه



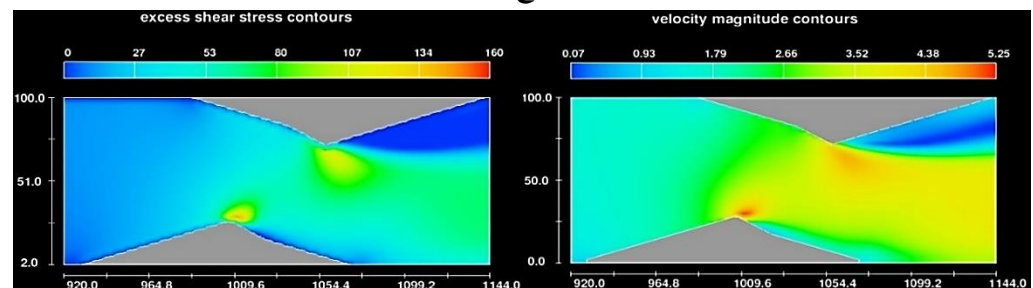
(الف)



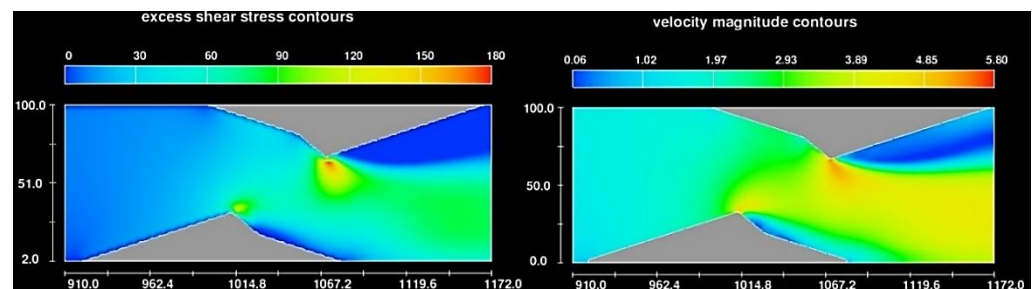
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۱۰. سرعت (سمت راست) و تنش برشی (سمت چپ) در محدوده خاکریز و پل در زوایای بیه‌های الف (صفر، ب) ۱۰ درجه، ج) ۲۰ درجه، د) ۳۰ درجه و ه) ۴۰ درجه نسبت به رودخانه

بررسی سرعت به جای بررسی تنش برشی استفاده کرد. همچنین تغییرات سینوسی سرعت و تنش برشی بیانگر این مسئله است که روش طراحی انتخاب شده برای تعیین هندسه دیوار هدایت آب بالادست و پایین دست پل، توانسته است از تغییرات شدید سرعت و تنش برشی در بیه های مختلف جلوگیری کند. بدین معنی که انتظار بر این بود با افزایش زاویه بیه، به دلیل پیچیده تر شدن شرایط پل در مواجهه با جریان، مقدار بیشینه سرعت و بیشینه تنش برشی افزایش یابد؛ اما با عملکرد مناسب دیوار هدایت آب (بر اساس الگوی تعریف شده در شکل ۷)، از افزایش مقادیر بیشینه سرعت و تنش برشی به صورت صعودی با افزایش مقدار زاویه بیه، جلوگیری شده است.

نتیجه گیری

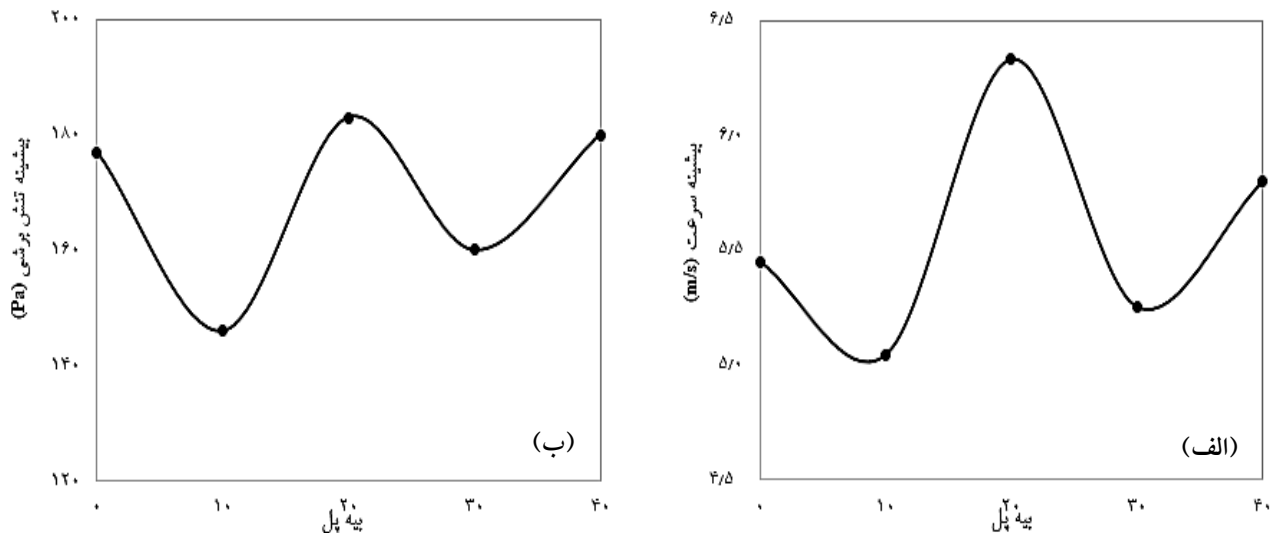
مهم ترین دلیل تخریب پل های رودخانه ای، علل هیدرولیکی هستند. یکی از شایع ترین علل هیدرولیکی تخریب پل، بازشدگی ناکافی دهانه پل است. در این پژوهش سعی بر آن بود تا میزان مناسب بازشدگی دهانه پل از منظر عدم رخداد پدیده انسداد بررسی شود. در این راستا با توجه به تجربیات نویسندگان، فرضیاتی برای هندسه پل و هیدرولیک جریان در نظر گرفته شد و طول بازشدگی رودخانه بر اساس انرژی مخصوص در بالادست پل و با فرض عدم افت انرژی تعیین شد. همین فرضیات مبنای تحلیل یک بعدی و سه بعدی قرار گرفت. خروجی هر دو مدل تأیید می کند که صرف نظر کردن از افت انرژی سبب می شود تا نیاز به طول دهانه بیشتری برای جلوگیری از رخداد برگشت آب وجود داشته باشد. همچنین میزان برگشت آب محاسبه شده توسط مدل یک بعدی بیشتر از مدل سه بعدی بود که می تواند ناشی از تغییر سطح آب در عرض در مدل سه بعدی باشد. همچنین تنش برشی بیشینه بستر در حالت سه بعدی بیشتر از حالت یک بعدی بوده است که آن هم ناشی از این مسئله است که در حالت سه بعدی تغییرات سرعت در عرض قابل محاسبه بوده و در نتیجه موقعیت دقیق تنش برشی

با توجه به اینکه در حالت احداث پل با بیه، تغییرات عرضی تراز سطح آب وجود دارد، تعیین میزان برگشت آب چندان راحت نیست. بدین منظور فرض شد مقطعی از بالادست پل که تراز سطح آب تا حدود زیادی در عرض یکنواخت شده باشد، به عنوان معیار تعیین محل برگشت آب باشد. بدین ترتیب عمق آب در حالت بیه صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه به ترتیب برابر با ۲/۵۸، ۲/۶۷، ۲/۷۱، ۲/۸۷ و ۲/۹۸ استخراج شد (شکل ۹ خط چین). بدین ترتیب با توجه به عمق نرمال برابر با ۲/۵ متر، درصد افزایش عمق آب در بیه های صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه به ترتیب برابر با ۴/۸، ۶/۸، ۸/۴ و ۱۵/۶ درصد است.

در شکل ۱۰ توزیع مقدار بزرگی سرعت و تنش برشی در پلان در بیه های صفر تا ۴۰ درجه در محدوده خاکریز و پل نشان داده شده است. همان طور که قابل مشاهده است، مقادیر بیشینه سرعت و تنش برشی در اطراف کوله های پل شکل می گیرد و توزیع نسبتاً یکنواختی از سرعت و تنش در مابقی نقاط در راستای پل دیده می شود. همچنین در حالت کلی، مقادیر سرعت و تنش برشی در محدوده بعد از پل بیشتر از محدوده قبل از پل است که این امر نشان می دهد که نیاز به انجام اقدامات اصلاحی در بعد از پل، بیشتر از محدوده قبل از پل است.

در بیه های ۱۰ تا ۴۰ درجه گردابه های نسبتاً وسیعی دیده می شود (نقاط آبی پر رنگ نشان داده شده که حاکی از وجود گردابه هایی با سرعت پایین هستند) که پتانسیل رسوب گذاری در آنها بسیار زیاد است و با توجه به الگوی جریان، نقش چندانی در عبور جریان ندارند. از این رو می توان به منظور اقتصادی تر شدن طرح، طول دیوار هدایت آب پایین دست در ساحل سمت چپ را کمتر در نظر گرفت.

در شکل ۱۱ مقادیر بیشینه سرعت و تنش برشی در محدوده پل به نمایش درآمده است. روند تغییرات در هر دو نمودار از یک الگو پیروی می کند که نشان می دهد در مواقعی که تغییرات شدیدی در راستای خطوط جریان وجود ندارد، می توان از



شکل ۱۱. مقادیر بیشینه سرعت (سمت راست) و تنش برشی (سمت چپ) در محدوده پل در زوایای بیه صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه نسبت به رودخانه

می‌توان به منظور اقتصادی‌تر شدن طرح دیوار هدایت آب از دیوارهای کوتاه‌تری در پایین‌دست خاکریز شکافنده جریان استفاده کرد. میزان رشد بیشترین عمق آب در بیه ۴۰ درجه نسبت به بیه صفر درجه در محدوده خاکریز و پل، به ۱۱/۶۴ درصد محدود شد. تا بیه ۳۰ درجه مقادیر بیشینه تنش برشی در اطراف کوله هدایت‌کننده جریان (کوله سمت ساحل راست) اتفاق افتاد و در بیه ۴۰ درجه بیشینه تنش برشی در اطراف کوله شکافنده جریان (کوله سمت ساحل چپ) ایجاد شد. با توجه به الگوی جریان تقریباً بدون تغییر عبوری از محل پل که در اثر احداث دیوار هدایت با الگوی مناسب ایجاد شده است، مقادیر بیشینه تنش برشی و سرعت در یک محدوده قابل قبولی نوسان کرد.

بیشینه قابل تعیین و مقدار آن قابل محاسبه است. بنابراین توصیه می‌شود تا حد امکان از مدل‌های سه‌بعدی به منظور تحلیل برگشت آب استفاده شود؛ زیرا مدل‌های یک‌بعدی در تعیین میزان برگشت آب محافظه کارانه و غیراقتصادی بوده و در تعیین محل و میزان بیشینه تنش برشی بستر چندان توانا نیست. زمانی که احداث پل با زاویه نسبت به راستای عمود بر محور رودخانه اجتناب‌ناپذیر باشد، شرایط قدری پیچیده‌تر خواهد بود. بدین منظور الگویی برای تعیین دیوار هدایت آب پیشنهاد شد که با توجه به نمودارهای مقادیر بیشینه سرعت و تنش برشی، می‌توان چنین استنباط کرد که الگوی پیشنهادی برای عبور ایمن جریان از محل پل موفق بوده است و جریان تا حد زیادی در محدوده راستای پل بدون تغییر بود. البته که

منابع مورد استفاده

1. Akan, A.O. and S.S. Iyer. 2021. Open channel hydraulics. Butterworth-Heinemann, London.
2. Asadi, M., F. Kilanehei and A. Mahjoob. 2022. Numerical Study of Road Embankment Type Action on Shear Stress Around Skewed Bridge Abutment. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 17(4): 95–119.
3. Bahmanpouri, F., T. Lazzarin, S. Barbetta, T. Moramarco and D.P. Viero. 2024. Estimating velocity distribution and flood discharge at river bridges using entropy theory – insights from computational fluid dynamics flow fields. *Hydrology and Earth System Sciences* 28(10): 3717–3737. <https://doi.org/10.5194/hess-28-3717-2024>
4. Cui, Z. and X. Zhang. 2006. Flow and sediment simulation around spur dike with free surface using 3D turbulent model. *Journal of Hydrodynamics* 18: 237-244.
5. Daneshfaraz, R., M. Majedi Asl and T. OmidPour Alavian. 2025. Investigating the Hydraulic Efficiency of the Labyrinth Weir Using the Flow3D Numerical Method. *Journal of Water and Soil Science* 29 (1) 111-129 (in Farsi).

6. Erduran, K.S. G. Seckin, S. Kocaman and S. Atabay. 2012. 3D Numerical Modelling of Flow around Skewed Bridge Crossing, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 6(3): 475-489.
7. Ghasemzadeh, F. 2013. Simulation of hydraulic problems in FLOW-3D. Noavar Press, Tehran.
8. Haji Amou Assar, K., S. Atabay, A.G. Yilmaz and S. Sharifi. 2024. Backwater Level Computations Due to Bridge Constrictions: An Assessment of Methods. *Hydrology* 11(12): 220.
9. Haji Amou Assar, K., S. Atabay, A.G. Yilmaz and K.P. Fattah. 2021. Empirical analysis of backwater level due to skewed bridge constriction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management* 174(1): 42-50. <https://doi.org/10.1680/jwama.20.00017>
10. Hamill, L. 2004. Bridge Hydraulics. Taylor & Francis Press, New York.
11. Kimura, I. and T. Hosoda. 2003. A nonlinear k- ϵ model with realizability for prediction of flows around bluff bodies. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 42 (8): 813-837.
12. Kocaman, S. 2014. Prediction of backwater profiles due to bridges in a compound channel using CFD. *Advances in Mechanical Engineering* 6: 905217. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/905217>
13. Kocaman, S., G. Seckin and K. Erduran. 2010. 3D model for prediction of flow profiles around bridges. *Journal of Hydraulic Research* 48(4): 521-525.
14. Lazzarin, T., G. Constantinescu and D.P. Viero. 2024. Advanced Hydrodynamic Modelling of Flow at a River Bridge: Insights from 3D Computational Fluid Dynamics. *Procedia Structural Integrity* 62: 625-632. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.087>
15. Mahjoob, A. and R. Ghiassi. 2011. Application of a coupling algorithm for the simulation of flow and pollution in open channels. *World Applied Sciences Journal* 12(4): 446-459.
16. Mahjoob, A. and F. Kilanehei. 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* 62(4): 44-54.
17. Mayerle, R., S.S.Y. Wang and F.M. Toro. 1995. Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the flow in the vicinity of spur dikes. *Journal of Hydraulic Research* 33(2): 243-256.
18. McCoy, A., G. Constantinescu and J. Weber. 2008. Numerical investigation of flow hydrodynamics in a channel whit series of groynes. *Journal of Hydraulic Engineering* 134(2): 157-172.
19. Mohammadi, M., H. Ebrahimnezhadian, M. Asgarkhan maskan and V. Vaziri. 2022. Evaluation of the One and Two-Dimensional HEC-RAS Models' Performance in Determining Flood Zone of Rivers. *Journal of Water and Soil Science*, 26(2): 187-201 (in Farsi).
20. Molinas, A. and Y.I. Hafez. 2000. Finite element surface model for flow around vertical wall abutments. *Journal of Fluids and Structures* 14(5): 711-733.
21. Nasr-Allah, T.H., Y.A.M. Moussa, G.M. Abdel-Aal and A.S. Awad. 2016. Experimental and numerical simulation of scour at bridge abutment provided with different arrangements of collars. *Alexandria Engineering Journal* 55(2): 1455-1463.
22. NCHRP (National Cooperative Highway Research Program). 2011. Evaluation of Bridge-Scour Research: Abutment and Contraction Scour Processes and Prediction. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington. <https://doi.org/10.17226/22841>
23. Ouillon, S. and D. Dartus. 1997. Three-dimensional computation of flow around groyne. *Journal of Hydraulic Engineering* 123(11): 963-970.
24. Rodi, W. 1984. Turbulence models and their application in hydraulic, a state of the art view, University of Karlsruhe, Karlsruhe.
25. Safaei, S., F. Kilanehei and A. Mahjoob. 2021. Numerical Modeling of the Effect of Abutment Length in the Floodplain on Bed Shear Stress and Flow Momentum. *Journal of Water and Soil Conservation* 27(6): 169-184 (in Farsi). [doi: 10.22069/jwsc.2021.17610.3312](https://doi.org/10.22069/jwsc.2021.17610.3312).
26. Sehat, M., A. Bordbar, A. Masjedi and M. Heidarnajad. 2023. Investigating the Effect of Slot Dimensions in Bridge Abutments on the Scour Hole's Depth. *Journal of Water and Soil Science* 27(4): 143-152 (in Farsi).
27. U.S. Army Corps of Engineering. 2018. HEC-RAS 5.0 Supplemental to User's Manual; U.S. Army Corps of Engineering: Huntsville, AL, USA.
28. Wardhana, K. and F.C. Hadipriono. 2003. Analysis of Recent Bridge Failures in the United States. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 17 (3): 144-150.
29. Xuelin, T., D. Xiang and C. Zhicong. 2006. Large eddy simulation of three dimensional flows around a super dike. *Journal of Tsinghua Science and Technology* 11(1): 117-123.
30. Yazdi, J., H. Sarkardeh, H.M.D. Azamatulla and A. Ghani. 2010. 3D simulation of flow around a single spur dike with free surface flow. *International Journal of River Basin Management* 8(1): 55-62.