

Investigation of Bridge Pier Scour Depth Caused by the Accumulation of Floating Debris Using HEC-RAS Software (Case Study: Saqqez River)

Seyed Dana Parizadi¹, Mohsen Isari^{2*}, Ehsan Jafari Nodoushan³

1. Master's Student in Water Resources Engineering and Management, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Campus of Bijar, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.

* m.isari@uok.ac.ir

Received: 5 May 2024

Accepted: 2 September 2024

Discussion: 23 September 2025



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Scouring around bridge piers is a critical issue in hydraulic engineering, as it can lead to severe structural damage, financial losses, and even casualties due to bridge failure. Researchers identify local scour around bridge piers as one of the primary causes of bridge collapse. One of the key factors contributing to an increase in local scour depth is the accumulation of floating debris, such as tree trunks and branches, around bridge piers. This study aims to investigate the local scour depth at the piers of the Saqqez River bridge, considering the effects of floating debris accumulation and the presence of a tributary inflow.

Methodology: This study investigates local scour depth at bridge piers using the HEC-RAS hydraulic model. The selected bridge spans the Saqqez River within the Lake Urmia basin and comprises five circular-crested piers. The numerical model applies steady flow equations to calculate hydraulic parameters and employs two empirical equations-Colorado State University (CSU) and Froehlich-to estimate scour depth. The CSU equation accounts for correction factors such as pier shape, flow angle of attack, bed material conditions, and armoring effects. In contrast, the Froehlich equation estimates scour depth based on the pier shape coefficient. The model is validated using measured water surface elevations, central channel velocities, Froude numbers, and energy levels for a 100-year flood event. Flood discharges for return periods of 2, 5, 10, 25, 50, 100, and 200 years are 106, 193, 284, 428, 552, 685, and 742 m³/s for the Saqqez River and 19, 35, 52, 79, 101, 127, and 153 m³/s for its tributary, the Vali Khan River. Boundary conditions are defined using standard slope assumptions. To assess the impact of floating debris accumulation on scour depth, debris dimensions are considered 20 meters in length and 1.2 meters in width, positioned symmetrically across the pier width. The results demonstrate the influence of flood magnitude and debris accumulation on scour depth, particularly for piers located in the main channel.

Results and Discussion: The study divides the bridge piers into two categories based on their

location: side banks (two piers) and main channels (three piers). Manning's flow coefficient differs between these two categories, with a more significant coefficient for side bank piers, leading to lower velocities and flow rates than the central channel piers. This hydraulic variation influences the scour depth increment trends under natural conditions, tributary inflow, and debris accumulation across different flood events. In comparison with prior studies, such as Rahimi et al. (2020), which examined the effects of accumulated floating objects on scour hole geometry in laboratory experiments using a constant Manning roughness coefficient, our study considers a more dynamic approach by factoring in variations in the roughness coefficient between different pier locations. Additionally, Daneshfaraz et al. (2019) used HEC-RAS to model scour depth under increasing flow conditions and compared results from empirical equations like CSU and Froehlich, but without considering debris accumulation, a key focus in this research. Our findings indicate that both tributary inflow and debris accumulation exacerbate scour depth. Specifically, debris accumulation, especially for side bank piers, significantly increases scour depth during smaller flood events (2- and 5-year floods). For more significant flood events, the tributary inflow plays a dominant role in increasing scour depth, particularly at the intermediate piers in the main channel. This study highlights the critical influence of debris accumulation and tributary inflows, offering more comprehensive insights into the local scour dynamics at bridge piers. It underscores the importance of considering these factors for more accurate flood risk management and bridge design strategies.

Conclusion: This study evaluated local scour at Saqqez River bridge piers using CSU and Froehlich methods, focusing on debris accumulation and 200-year flood events. Debris significantly increased scour, especially during 2-year floods. For the 200-year flood, scour depth increased by approximately 1% due to debris accumulation. Branch flow resulted in higher scour depths for central channel piers. Maximum scour occurred at Pier 4 under branch flow and 200-year flood conditions. Considering more parameters, CSU results were generally 21-22% higher than Froehlich's, indicating higher reliability.

Keywords: Bridge pier scour, Debris accumulation, HEC-RAS software, Branch flow.

بررسی عمق آبستگي پایه‌های پل ناشی از انباشت اجسام شناور با استفاده از نرم افزار HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه سقز)

سید دانا پریزادی^۱، محسن ایثاری^{۲*}، احسان جعفری ندوشن^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، پردیس بیجار، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

* m.isari@uok.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ و بگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: موضوع آبستگي پایه‌های پل از اهمیت زیادی برخوردار است. زیرا این پدیده می‌تواند تبعات زیادی از جمله خسارات جانی و مالی ناشی از شکست پل را به همراه داشته باشد. محققین آبستگي موضعی اطراف پایه پل‌ها را یکی از مهمترین عوامل تخریب پل‌ها می‌دانند. یکی از دلایل اصلی که باعث افزایش عمق آبستگي موضعی می‌گردد انباشت مواد شناور جریان رودخانه‌ها، نظیر تنه و شاخ و برگ درختان در اطراف پایه‌های پل می‌باشد. هدف از پژوهش بررسی میزان آبستگي پایه‌های پل رودخانه سقز بر اثر تجمع اجسام مواد شناور و وجود شاخه ورودی بر رودخانه سقز می‌باشد. برای این منظور از نرم‌افزار HEC-RAS برای بررسی آبستگي موضعی پایه‌های پل رودخانه سقز با استفاده از دو روش CUS و فرولیچ استفاده شد. قابلیت مدل عددی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده ارتفاع سطح آب، سرعت کانال اصلی، عدد فرود و تراز سطح انرژی برای سیلاب ۱۰۰ ساله اعتبار سنجی گردید. مقایسه نتایج قابلیت بسیار خوب مدل عددی در پیش بینی پارامترهای جریان را نشان می‌دهد. بررسی اثر انباشت مواد شناور جریان و وجود شاخه فرعی بر آبستگي پایه پل نشان داد که عمق آبستگي موضعی پایه‌های سواحل کناری کمتر از پایه‌های واقع در کانال اصلی است ولی تاثیر وجود شاخه یا انباشت اجسام شناور بر افزایش عمق آبستگي برای این پایه‌ها بیشتر است. ترتیب بزرگی عمق گودال آبستگي موضعی برای سیلاب‌های مختلف به ترتیب برای پایه‌های واقع در کانال اصلی و سواحل کناری رودخانه است. حداکثر عمق آبستگي موضعی در محل پایه‌های واقع در کانال اصلی رودخانه رخ داده است. این مقدار برای سیلاب ۲۰۰ ساله و با در نظر گرفتن شاخه فرعی توسط معادله $1/15 CSU$ متر محاسبه شده و معادله فرولیچ مقدار عمق را $1/04$ متر محاسبه کرده است.

کلیدواژگان: آبستگي پایه پل، انباشت اجسام شناور، نرم افزار HEC-RAS، شاخه فرعی.

۱- مقدمه

بدین صورت است که وجود پایه پل تغییرپذیری‌هایی در میدان خطوط جریان ایجاد می‌کند. جدا شدن خطوط جریان در پیرامون پایه باعث ایجاد ناحیه‌های پر فشار و کم فشار به ترتیب در بالادست و پایین‌دست آن شده و در ناحیه کم فشار گردابه‌های نعل اسبی به وجود می‌آید. ناحیه فشرده‌گی خطوط جریان و افزایش سرعت در راستای طولی مقطع پایه رخ می‌دهد (Dey, 2014). همواره پایداری پل‌ها در معرض عامل‌های زیانبار زیادی مانند؛ بارهای هیدرودینامیکی، آبستگي بستر کلی یا موضعی یا

احداث پل بر روی رودخانه موجب تغییر رژیم جریان شده، این تغییر الگو موجب افزایش سرعت جریان در بستر رودخانه می‌شود. تنش برشی نسبت مستقیم با مجذور سرعت متوسط جریان دارد. به همین علت تنش برشی بستر در مقطع پل افزایش می‌یابد (Dey, 2014). هنگامی که تنش برشی وارده بیشتر از تنش برشی بحرانی ذرات بستر باشد فرسایش رخ داده که به این پدیده مهم آبستگي گفته می‌شود. سازوکار رخ دادن این پدیده

می‌شود. بررسی پل‌های مستعد انباشت جسم‌های شناور در انگستان به این نتیجه رسید که وجود آوار در بالادست پایه پل موجب تشدید آبستگي و افزایش خطر خروج سیلاب از حریم رودخانه شده‌است. یک سوم تخریب پل‌های ناشی از آبستگي شدید در ایالات متحده به علت انباشته شدن اجسام شناور بالادست پایه‌ها بوده‌است. لذا بررسی و بازرسی میزان آبستگي پایه و تکیه‌گاه پل‌هایی که مستعد تجمع جسم‌های شناور هستند دارای اهمیت زیادی است (Panici et al., 2020). انباشت جسم‌های شناور به‌طور معمول به دو صورت تجمع تک پایه یا انسداد دهانه مشاهده شده‌است. افزایش ارتفاع سطح آب و سرعت جریان در محل پایه پل از پیامدهای ناشی از وجود جسم‌های شناور در بالادست است (Lagasse et al., 2010).

Pournazeri et al. (2014) با استفاده از مدل سه بعدی نا هیدرواستاتیک به این نتیجه رسیدند، نایکنواخت بودن بستر رسوبي (شرایط واقعی رودخانه) باعث کاهش عمق آبستگي پایه پل شده‌است. نتایج آزمایشگاهی Rahimi et al. (2018) نشان داد مستطیلی بودن شکل تجمع جسم‌های شناور موجب تشکیل گردابه‌های قوی‌تر در پشت پایه شده و مقدار عمق آبستگي افزایش یافته‌است.

Omara et al. (2019) با انجام روش آزمایشگاهی به بررسی تاثیر شکل و زاویه انحراف پایه نسبت به محور عمودی بر آبستگي موضعی پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که افزایش انحراف برای پایه مستطیلی عمق آبستگي را افزایش داده ولی با افزایش نسبت طول به عرض پایه مقدار عمق گودال کمتر شده‌است. Carnacina et al. (2019) با تحلیل شرایط جریان تحت فشار پیرامون پایه در آزمایشگاه به این نتیجه رسیدند که با در نظر گرفتن حضور جسم‌های شناور در بالادست پایه شرایط هیدرولیکی دست‌خوش تغییر شده و مقدار آبستگي بیشتر شده‌است. Eshaghian et al. (2019) نشان دادند یکنواخت نبودن دانه‌بندی بستر با افزایش مقاومت برشی در برابر جریان و ایجاد لایه سپر در مقابل جریان، باعث جلوگیری از عمیق‌تر شدن گودال آبستگي می‌شود. Daneshfaraz et al. (2019) با محاسبه آبستگي

هر دو، قرار دارد. از بین این موارد، دلیل اصلی خرابی پل‌ها آبستگي موضعی می‌باشد (Najafzadeh & Mahmaudi-Rad 2019). یکی از عامل‌های تشدیدکننده پدیده آبستگي موضعی، انباشت جسم‌های شناور (مواد چوبی) در پیرامون پایه‌های پل می‌باشد. هندسه انباشت مواد به ویژگی‌های فیزیکی مواد، میزان مواد انتقال یافته به محل پایه پل، شرایط جریان، هندسه پل و آبراهه بستگی دارد. بسته به شرایط جریان در بالادست پایه پل، تغییر مسیر جریان در اثر انباشت مواد باعث انقباض و انسداد جریان شده و سرعت جریان در محل پایه پل را افزایش می‌دهد. این موضوع افزایش فرسایش و عمق آبستگي را به دنبال دارد (Lagaase et al., 2010). سال ۲۰۰۱ میلادی پل هینتزه ریبیرو در کشور پرتغال به علت رخ دادن متوالی سه سیلاب با دبی بالا در سه ماه و آبستگي پایه و پی آن شکسته شد و باعث مرگ ۵۹ نفر شد. پس در نظر رفتن شرایط هیدرولیکی و هیدرولوژی در کنار شرایط سازه‌ای از الزامه‌های ضروری در طراحی و پایش سلامت پل‌ها است (Bento et al., 2020).

بررسی‌های انجام گرفته برای تبیین علت شکست پل‌ها توسط ایالات متحده بین سال‌های ۱۹۶۱ و ۱۹۷۴ نشان داد حدود ۵۳٪ از شکست پل‌ها به دلیل رخداد آبستگي رخ داده است. همچنین برآورد شد زیان‌های مالی ناشی از تغییر اقلیم به شالوده پایه‌ها و تکیه‌گاه پل سالانه چیزی حدود ۵۰ میلیون دلار است (Shahriar et al., 2021).

دهه‌های اخیر، پژوهش‌های آزمایشگاهی و میدانی بسیاری برای شناخت سازوکار پدیده آبستگي تحت اثر مواد صورت گرفته است. Toch & Laursen. (1956) تأثیرگذاری انباشت مواد بر فرایند آبستگي را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی و ارزیابی و مشاهده کردند، حضور مواد منجر به افزایش عمق حفره‌ی آبستگي می‌شود.

Sutherland & Melville (1988) طراحی به‌منظور برآورد بیشینه عمق آبستگي در پیرامون پایه‌های پل ارائه کردند. برای هدف‌های طراحی، بیشینه عمق آبستگي تحت اثر انباشت جسم‌های شناور می‌تواند با در نظر گرفتن یک قطر پایه پل بزرگتر، نسبت به قطر پایه پل حقیقی برآورد شود. این قطر پایه بزرگتر، قطر مؤثر نامیده

جمع‌شدگی جسم‌های شناور به کمک معادله‌های CSU و فرولیچ موجود در نرم‌افزار محاسبه شده‌است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهرستان سقز برابر شکل ۲ در استان کردستان قرار دارد، استان کردستان در غرب کشور ایران قرار دارد. رودخانه‌های سقز و ولی‌خان از داخل شهرستان سقز عبور می‌کنند. برابر شکل ۳ رودخانه سقز از کوهستان‌های (کیله شین، وزنه، گردنه خان) واقع در غرب شهرستان سقز سرچشمه می‌گیرد. مساحت حوضه آبریز رودخانه سقز ۵۷۹۰۵ کیلومتر مربع و شیب میانگین حوضه به طور میانگین ۲۲/۶۸ درصد است. رودخانه ولی‌خان از رودهای فصلی کوهستان‌های شمال (ملقرنی، جائل) شهرستان سقز و بخش کوچکی از آب گردآوری شهری سرچشمه گرفته و در نهایت وارد رودخانه سقز شده که در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه قرار دارد. مساحت حوضه آبریز رودخانه ولی‌خان ۱۷/۸ کیلومتر مربع و شیب متوسط حوضه ۱۴/۰۸ درصد است. پل مجتمع تجاری کردمال دارای پنج دهانه و پایه‌های مستطیلی شکل با دماغه‌ی گرد می‌باشد که در شکل ۳ قابل مشاهده‌است. آزمایش تعیین دانه‌بندی بستر رودخانه همان‌طور در شکل ۱ نشان داده شده است در محل قرارگیری پل مجتمع تجاری توسط آزمایشگاه خاک استان کردستان صورت گرفته‌است. طبقه‌بندی آن از نوع شنی با دانه‌بندی بد و همراه با ماسه و لای بوده و میزان‌های d_{95} و d_{50} به‌ترتیب ۹ و ۷۰ میلی‌متر و عمق رسیدن به سنگ بستر ۴ متر است.

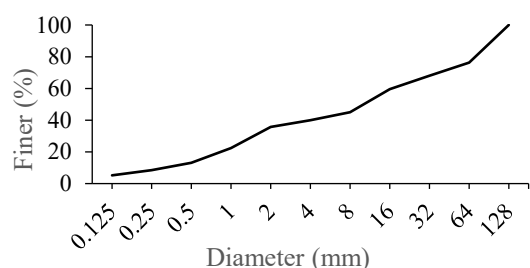


Fig. 1 Bed Gradation

شکل ۱ منحنی دانه‌بندی بستر رودخانه

پایه‌های پل سیمینه‌رود در میان‌دوآب با نرم‌افزار HEC-RAS دریافتند روش فرولیچ نسبت به تغییرپذیری‌های دبی جریان رودخانه حساسیت کمتری دارد. افزایش سطح آب در مقطع پل برای سیلاب‌های بزرگ منجر به خروج جریان از حریم رودخانه و افزایش مقدار آبشستگی در پایه‌های کناری پل شده‌است. (Yu & Zhu (2020) با حل عددی معادله سه‌بعدی RANS و بررسی تاثیر شکل پایه بر میزان آبشستگی نشان دادند در بازه‌ی زمانی مشخص مقدار عمق چاله پایه‌های استوانه‌ایی و دماغه گرد یکسان است و شکل پایه تاثیر زیادی بر عمق چاله داشته ولی بر گستردگی مساحت گودال تاثیر کمی دارد. Rahimi et al. (2020) با بررسی پدیده آبشستگی در آزمایشگاه به این نتیجه رسیدند جمع‌شدگی جسم‌های شناور بر هندسه گودال آبشستگی تاثیر بسزایی دارد، افزون بر عمیق شدن آن را به‌صورت طولی و عرضی گسترش می‌دهد. Aziz & Shafai Bajestan (2023) با حساسیت سنجی چهار روش تجربی محاسبه آبشستگی موضعی برای فراسنجه‌های d_{50} ذرات رسوبی بستر، سرعت و عمق جریان به این نتیجه رسیدند که روش HEC-18 برای هنگامی که داده‌های موجود قابل اعتماد نیستند کارایی خوبی دارد. بررسی پیشینه تحقیقات انجام شده نشان داد اثر شکل پایه‌های پل بر هندسه گودال آبشستگی موضعی، تاثیر تغییرپذیری دبی جریان عبوری از مقطع پل بر عمق آبشستگی، تاثیر احتمال انباشت جسم‌های شناور در بالادست پایه‌های پل بر توسعه هندسه چاله آبشستگی و اثر دیگر فراسنجه‌ها مانند: زاویه برخورد جریان با پایه پل مورد توجه محققان قرار گرفته‌است.

در این پژوهش با داشتن چند پیش‌فرض مختلف که شامل: وجود شاخه رودخانه و انباشت جسم‌های شناور در بالادست پل است، مقدار آبشستگی موضعی پایه‌های پل بررسی شده‌است. با داشتن نقشه ناهمواری واقعی منطقه مورد بررسی از مدل هیدرولیکی HEC-RAS که توانایی اعمال کامل نقشه ناهمواری منطقه به‌صورت سه‌بعدی در این نرم‌افزار دارد استفاده شده‌است. عمق آبشستگی موضعی پایه‌های پل برای سیلاب‌های بازگشتی مختلف، اضافه شدن شاخه فرعی به رودخانه در بالادست پل،

را با مدل کردن رودخانه و تعریف شرایط جریان یکنواخت محاسبه می‌کند. نرم افزار HEC-RAS آبستگي موضعی پایه‌های پل با داشتن شکل و قطر پایه، زاویه برخورد جریان، d_{50} و d_{95} ذرات بستر رودخانه، سرعت و عمق جریان آبستگي موضعی پایه پل را با رابطه‌های CSU و فرولیچ محاسبه می‌کند (Ghosh et al., 2021 & Brunner, 2023). معادله CSU از جمله معادله‌های مورد استفاده در آیین‌نامه اداره بزرگراه فدرال آمریکا بوده، که در آزمایشگاه دانشگاه کلرادو برای جریان‌های حاوی رسوب و آب زلال توسعه داده شده‌است. معادله دارای ضریب‌های تصحیح شکل پایه، زاویه برخورد جریان، شرایط بستر و عامل در نظر گرفتن تشکیل لایه سپر است (Saha et al., 2018). رابطه (۱) معرف این معادله است:



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Kurd mall commercial complex bridge view: a) Bridge section, b) Upstream of Bridge and c) Satellite map of case study.

شکل ۴ نمای پل مجتمع تجاری کردمال: (a) نمای مقطع پل، (b) بالادست پل و (c) نقشه ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه.

جدول ۱ ویژگی‌های پل مجتمع تجاری

Table. 1 Geometric parameters of the commercial complex bridge

Number of piers	Pier (m) diameter	Pier height (m)	Shape of pier
5	1.5	5.5	Round nose



Fig. 2 The geographical location of Saqez city in Iran

شکل ۲ موقعیت شهرستان سقز در تقسیم‌های سیاسی - جغرافیایی ایران

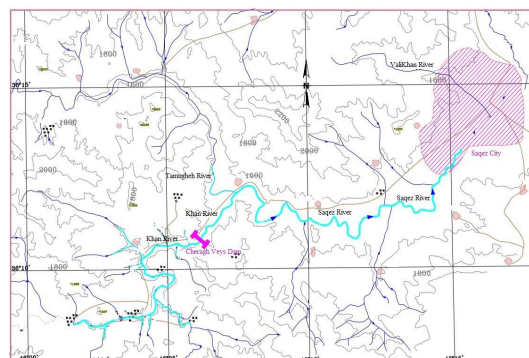


Fig. 3 The watershed of the Saqez and Valikhan rivers

شکل ۳ حوزه آبخیز رودخانه‌های سقز و ولی‌خان

۲-۲- نرم‌افزار HEC-RAS

از جمله نرم‌افزارهای کاربردی در زمینه مدل‌سازی هیدرولیک جریان رودخانه، نرم‌افزار HEC-RAS است. این نرم‌افزار توانایی مدل‌سازی و تحلیل هیدرولیکی رودخانه و سازه‌های هیدرولیکی برای جریان‌های ماندگار و ناماندگار را دارد. از ویژگی‌های نرم‌افزار می‌توان به بررسی انتقال رسوب، انواع آبستگي، کیفیت آب، هیدرولیک جریان بعد از شکست سازه‌های جانبی اشاره کرد (Brunner, 2023). افزونه طراحی هیدرولیکی عمق آبستگي‌های تنگ‌شدگی، موضعی پایه و تکیه‌گاه‌های پل

نقشه ناهمواری موجود از رودخانه سقز تهیه شده از اداره شهرداری شهرستان سقز، نقشه مدل ارتفاعی دیجیتالی^۲ تهیه شد. سپس از طریق افزونه راس مپر^۳ نرم افزار نقشه مدل ارتفاعی دیجیتالی وارد محیط نرم افزار شده و با ویژگی های این افزونه همان طور در شکل ۵ مشخص است، مقطع های عرضی بازه رودخانه، بالادست و پایین دست پل و محل اتصال دو رودخانه (فاصله محل اتصال دو رودخانه تا محل پل حدودا ۳۰۰ متر است) ایجاد می شود. داده های مدل عددی پژوهش با داده های مورد بررسی شرکت آب منطقه ای استان کردستان در زمینه پل مجتمع تجاری کردمال سقز مقایسه شده است.



Fig. 5 DEM, cross sections and bridge location
شکل ۵ نقشه DEM، مقطع های عرضی و پل مدنظر

همزمان با تعریف هندسه سازه پل در مقطع عرضی می توان جسم های شناور را شکل ۶ در نرم افزار به صورت مستطیلی و با مشخص کردن طول و عرض آن، روی پایه با مسدود کردن قسمتی از دهانه های کناری پایه پل ایجاد کرد. HEC-RAS جسم های شناور را منطبق بر عمق جریان در نظر گرفته، طوری که در عمق کم ارتفاع آوار به نسبت به عمق کاهش یافته ولی در عمق جریان بزرگتر مقدار ارتفاع هندسه شکل جمع شدگی همان مقدار تعریفی خواهد بود. نرم افزار آبشستگی را بر مبنای فراسنجه های به دست آمده از تجزیه و تحلیل جریان ماندگار بررسی می کند. با توجه به اینکه رژیم جریان زیر بحرانی است، شرایط مرزی بالادست و پایین دست رودخانه با مقدار شیب نرمال تعریف شده است. شکل ۷ نمای سه بعدی از بالادست و پایین دست پل مدنظر است، همچنین بستر سیلابی حالت اولیه (بدون وجود عوامل خارجی) را برای سیلاب ۱۰۰ ساله نمایش داده است.

$$\frac{y_s}{a} = 0.32 \phi Fr_1^{0.22} \left(\frac{a'}{a}\right)^{0.62} \left(\frac{y_1}{a}\right)^{0.47} \left(\frac{a}{d_{50}}\right)^{0.09} \quad (1)$$

در معادله (۱)، ϕ ضریب تصحیح شکل پایه، a' تصویر عرض پایه در برابر جریان (متر)، d_{50} قطر ذراتی است که ۵۰٪ ذرات موجود در دانه بندی از آن ریزتر (متر) هستند. امکان لحاظ کردن انباشت مواد شناور در بالادست پایه پل با تعیین طول و عرض شکل مستطیلی آن در نرم افزار وجود دارد. برای این پژوهش مقدار ارتفاع و عرض جسم های شناور بر اساس بیشترین مقدار آن ها توسط ویل وود و فن ویک در سال ۱۹۸۹ توصیه شده که به ترتیب ۱/۲ و ۲۰ متر است. میزان های فرض شده با انجام بررسی های صورت گرفته برای بررسی اثرگذاری نیروی وارده بر پایه های پل ناشی از جمع شدگی آوار به دست آمده است (Parola, 2000).

۲-۳- تعریف مدل هیدرولیکی

با توجه به ایستگاه های آب سنجی و هوا شناسی منطقه مورد مطالعه، بارندگی های شش و ۲۴ ساعته برای دوره بازگشت های مختلف به دست آمده و دبی های بیشینه یک روزه و لحظه ای ۵۰ ساله آبی بالادست رودخانه سقز نیز قابل دسترسی بود. میزان بیشینه سیلاب در دوره برگشت های مختلف برای رودخانه های سقز و ولی خان با مقایسه روش های مختلف و راستی آزمایی آن با داده های اندازه گیری شده به ترتیب با روش های کریگر و سازمان حفاظت خاک آمریکا^۱ برآورد شده است. مقدار بیشینه سیلاب های بازگشتی دو ساله تا ۲۰۰ ساله در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ سیلاب با دوره تناوب های مختلف برای رودخانه های سقز و ولی خان بر حسب مترمکعب بر ثانیه

Table 2 Flood discharge with different periods for Saqez and Vali Khan rivers (m³/s)

Time (Years)	2	5	10	25	50	100	200
Saqez	106	193	284	428	552	685	742
Vali Khan	19	35	52	79	101	127	153

برای تعریف مدل در نرم افزار HEC-RAS نیاز به نقشه ناهمواری منطقه مورد مطالعه است. برای همین با توجه به

2 DEM
3 RAS MAPPER

1 SCS

۳- نتایج و بحث

سازه‌ی پل‌ها از لحاظ هیدرولیکی همیشه در معرض سیلاب‌های مختلف، انسداد بیشتر دهانه توسط انباشت جسم‌های شناور بوده‌است. از این رو بررسی عامل‌های مختلف تاثیر گذار بر ایمنی پل‌ها در اولویت‌های اصلی برای طراحان و محققان است. در این پژوهش سعی شده مقدار آبستگي موضعی پایه‌های پل به‌صورت جداگانه برای سه پیش‌فرض وجود انباشت جسم‌های شناور، وجود شاخه فرعی و حالت طبیعی تحلیل شده‌است. عمق گودال با معادله‌های CSU و فرولیچ برای پایه‌ها در ساحل‌های کناری و آبراهه رودخانه اصلی برای همه‌ی سناریوهای تعریف شده محاسبه شده‌است.

۳-۱- صحت‌سنجی مدل عددی

داده‌های اندازه‌گیری شده ارتفاع سطح آب، سرعت آبراهه اصلی، عدد فرود و تراز سطح انرژی برای سیلاب ۱۰۰ ساله برمبنا داده‌های میدانی اداره آب منطقه‌ای استان کردستان است. مقدار ضریب مانینگ برای آبراهه اصلی رودخانه و ساحل‌های کناری برمبنا بازدید میدانی به‌ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۱ است. مقدار خطای مدل عددی این پژوهش در مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده با معادله میانگین خطای ریشه مربع نرمال شده محاسبه شده‌است. رابطه‌های (۲) و (۳) در زیر معرف معادله میانگین خطای ریشه نرمال شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_n - x_p)^2} \quad (2)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{x}} \quad (3)$$

در معادله (۲) π شمار داده‌ها، x_M مقدار اندازه‌گیری شده، x_p مقدار محاسبه شده‌است. \bar{x} در رابطه (۳) میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده است. مقدار خطا مدل عددی برای فراسنجه‌های ارتفاع سطح آب، سرعت آبراهه اصلی، عدد فرود و تراز سطح انرژی به‌ترتیب ۰/۰۲، ۰/۴۵۵، ۶/۱۱ و ۰/۰۲ درصد است. این نشان دهنده دقت مدل عددی حاضر در پیش بینی فراسنجه‌های مورد نظر است. نمودارهای مقایسه فراسنجه‌ها و نمودار همبستگی آن‌ها

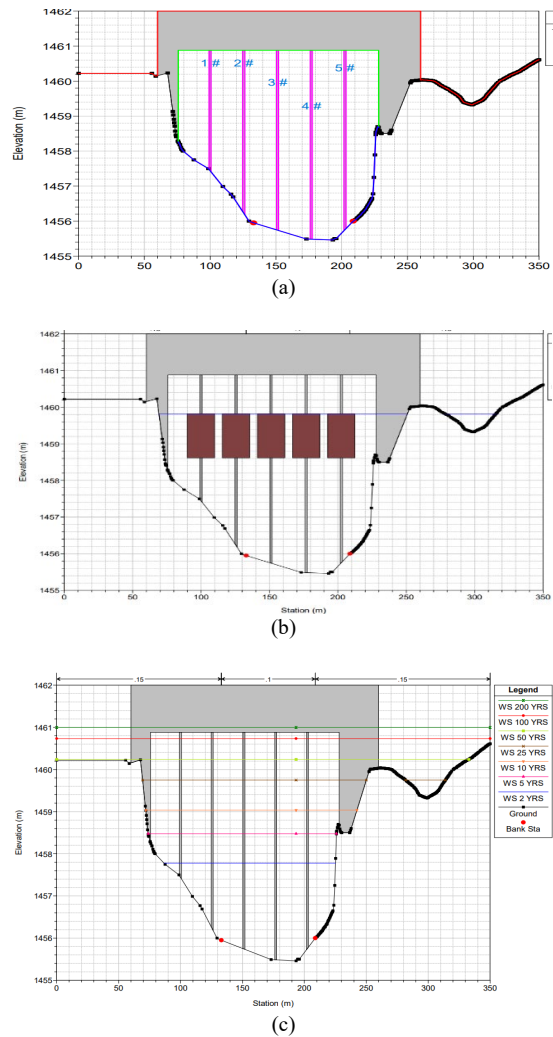


Fig. 6 Geometry of bridge: a) Cross section of bridge, b) Accumulation of debris in the cross section of the bridge and c) Water level's for different floods

شکل ۶ هندسه پل: (a) مقطع عرضی پل، (b) تجمع آوار در مقطع پل و (c) نیم‌رخ سطح آب برای سیلاب‌های مختلف

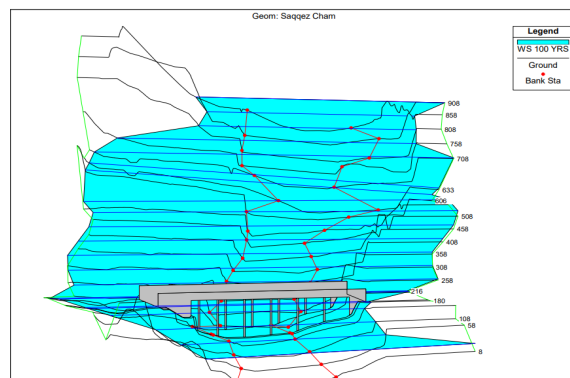


Fig. 7 3D view of 100-year floodplain for the case study
شکل ۷ نمای سه‌بعدی بستر سیلابی ۱۰۰ ساله برای منطقه مورد مطالعه

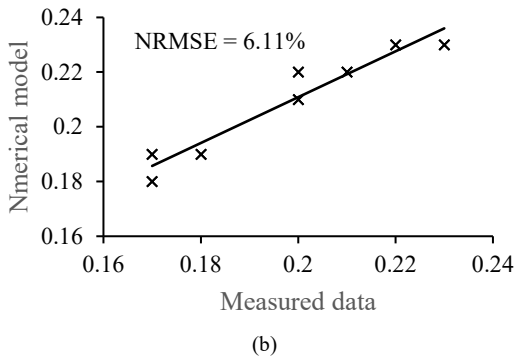
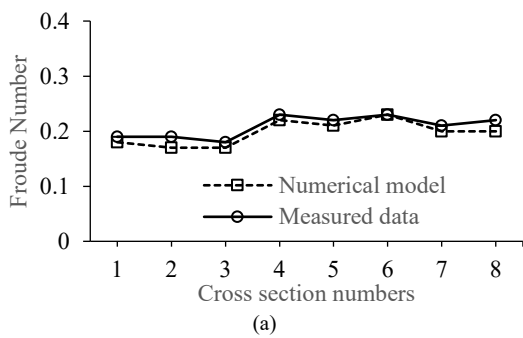


Fig. 10 Froude number Verification diagrams: a) comparison diagram and b) Scatter diagram

شکل ۱۰ نمودارهای صحت سنجی عدد فرود: (a) مقایسه فراسنجه‌ها و (b) نمودار پراکندگی

در شکل‌های ۸ تا ۱۱ نمایش داده شده است.

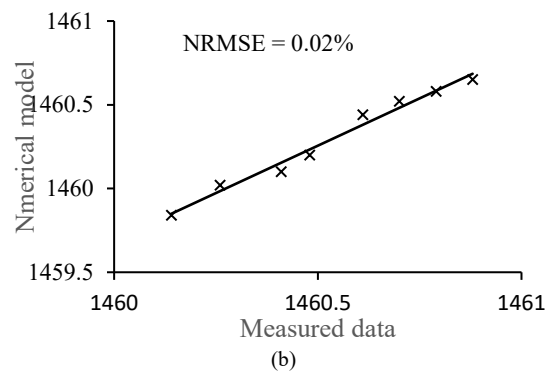
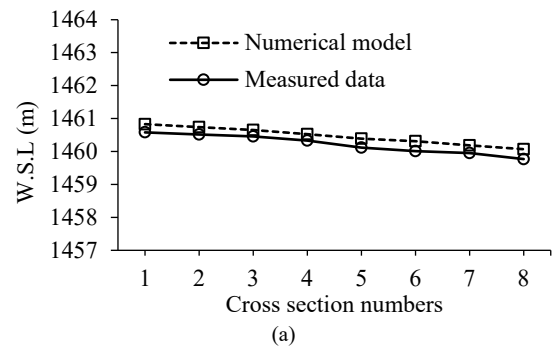


Fig. 8 Water level Verification diagrams: a) comparison diagram and b) Scatter diagram

شکل ۸ نمودارهای صحت سنجی تراز سطح آب: (a) مقایسه فراسنجه‌ها و (b) نمودار پراکندگی

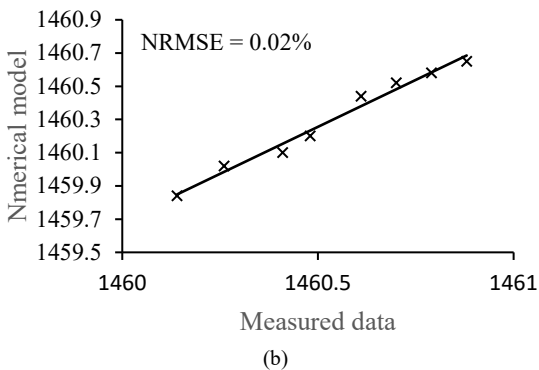
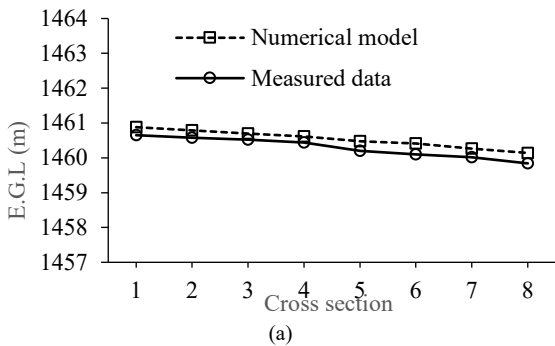


Fig. 11 Energy level Verification diagrams: a) comparison diagram and b) Scatter diagram

شکل ۱۱ نمودارهای صحت سنجی تراز سطح انرژی: (a) مقایسه فراسنجه‌ها و (b) نمودار پراکندگی

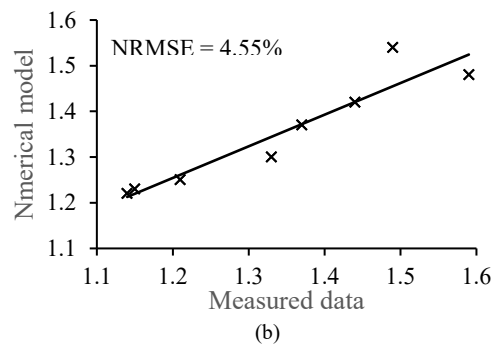
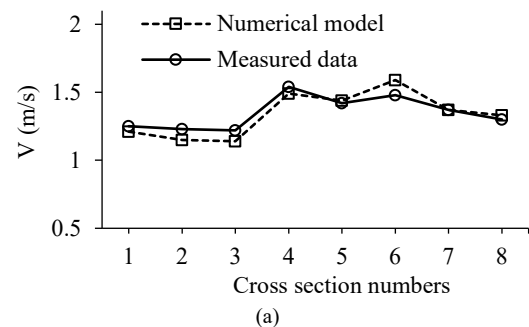


Fig. 9 Velocity in main channel Verification diagrams: a) comparison diagram and b) Scatter diagram

شکل ۹ نمودارهای صحت سنجی سرعت آبراه اصلی: (a) مقایسه فراسنجه‌ها و (b) نمودار پراکندگی

آب در سیلاب‌های ۲ و ۵ ساله تحت تاثیر انباشت جسم‌های شناور در بالادست پایه‌های پل است. افزایش مقدار دبی ناشی از وجود شاخه بر افزایش تراز سطح آب اثر بیشتری داشته است. درحالی‌که در سیلاب‌های بزرگ‌تر انباشت جسم‌های شناور موجب زیاد شدن تراز سطح آب شده ولی نسبت به حالت طبیعی مقدار آن اختلاف زیادی ندارد.

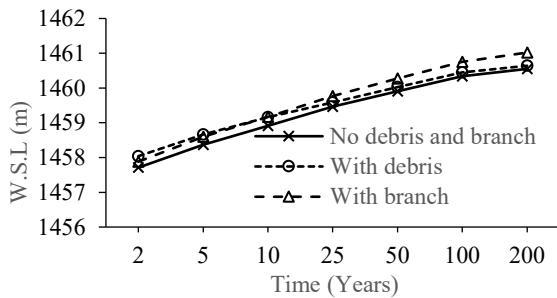


Fig. 13 Diagram of water level changes in section of the bridge

شکل ۱۳ تغییرپذیری‌های سطح تراز آب در مقطع پل

۳-۴- آبستتگی پایه‌ها در ساحل‌های کناری

حریم رودخانه از سه بخش اصلی شامل: سواحل کناری و آبراهه اصلی تشکیل شده‌است. آبراهه اصلی بخشی از رودخانه بوده که همیشه جریان از دبی کم تا سیلاب‌ها همیشه در آن جاری است. اما هنگامی که مقدار دبی بزرگ باشد جریان وارد ساحل‌های کناری می‌شود. معادله مانینگ نشان داد سرعت جریان تابعی از ضریب مانینگ، شعاع هیدرولیکی مقطع و شیب طولی آبراهه است. در مقطع پل کردمال شیب طولی رودخانه ثابت بوده ولی میزان شعاع هیدرولیکی و ضریب مانینگ ساحل‌های کناری از آبراهه اصلی رودخانه کمتر است. پس باید مطابق رابطه مانینگ سرعت جریان در ساحل سمت چپ و مقدار عمق آبستتگی پایه‌ها از آبراهه اصلی کمتر باشد. عمق آبستتگی برای پایه شماره ۱ با افزایش مقدار V/V_c (افزایش دبی) بیشتر شده است، همان‌طور که در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. تاثیر انباشت جسم‌های شناور برای دبی‌های کم (دبی‌های ۲ تا ۵ ساله) یا V/V_c کمتر از $1/27$ (دبی ۵ ساله) بر عمق آبستتگی بیشتر از وجود شاخه است. وجود شاخه در دبی‌های بالا (دبی‌ها ۱۰ تا ۲۰۰ ساله) برای V/V_c بزرگ‌تر از $1/50$ باعث افزایش عمق آبستتگی نسبت به حالت انباشت جسم‌های شناور شده است. عمق آبستتگی پایه شماره ۲ طبق شکل ۱۵ با افزایش مقدار نسبت V/V_c بیشتر

۳-۲- میانگین سرعت جریان مقطع پل

کاهش مساحت مقطع عرضی رودخانه برای عبور جریان در محل احداث پل ناشی از پایه‌ها و عرشه پل بوده‌است. این مسدود شدن قسمتی از مساحت مقطع عبوری منجر به تحت فشار قرار گرفتن جریان رودخانه (تنگ‌شدگی مقطع) شده‌است. جریان برای رهایی از اختلال ایجاد شده در الگوی حرکتی خود با سرعت بیشتری از این مقطع به‌ویژه بین پایه‌های پل عبور کند. حضور جسم‌های شناور در بالادست پایه‌ها، مقدار مساحت مقطع کاهش می‌یابد و تشدید سرعت جریان را به دنبال دارد. مطابق شکل ۱۲ بررسی تغییرات میانگین سرعت جریان در مقطع پل نشان داد، افزایش دبی رودخانه ناشی از وجود شاخه دوم سرعت نسبت به حالت اولیه افزایش خواهد یافت. البته این زیاد شدن سرعت بیشتر برای دبی‌های ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله بوده‌است. تجمع جسم‌های شناور در بالادست پایه‌های پل نسبت به وجود شاخه موجب افزایش بیشتر سرعت شده‌است. شیب تغییر سرعت از سیلاب ۱۰۰ ساله به ۲۰۰ ساله برای هر سه حالت مدنظر یکسان بوده است.

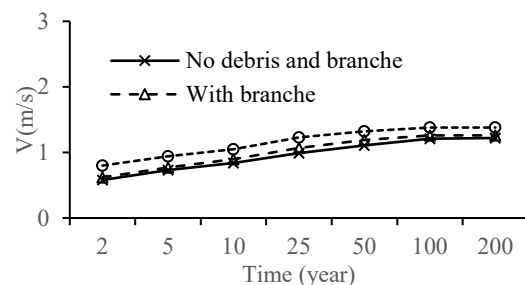


Fig 12 Diagram of velocity changes in the section of the bridge

شکل ۱۲ نمودار تغییرپذیری‌های میانگین سرعت در مقطع پل

۳-۳- تغییرپذیری‌های تراز سطح آب

وجود پل در مقطع عرضی رودخانه خود مانند: بازدارنده‌ای در برابر جریان رودخانه شده و موجب بالآمدن تراز سطح آب در بالادست رودخانه خواهد شد. به‌طور معمول افزایش دبی جریان خود افزون‌بر تغییر سرعت در مقطع پل، باعث زیاد شدن ارتفاع سطح آب در بالادست و هم در پایین‌دست پل خواهد داشت. کاهش سطح مقطع عبوری بالادست پل ناشی از جمع‌شدگی جسم‌های شناور هم‌بدین صورت تاثیرگذار بوده‌است. با توجه به شکل ۱۳ حداکثر افزایش ارتفاع سطح

۳-۵- آبخستگی پایه‌ها در آبراهه اصلی

کانال اصلی رودخانه همیشه در معرض رسوب‌گذاری و رسوب‌بردای است. هنگامی که پایه‌های پل در آبراهه اصلی ساخته می‌شوند، به‌طور معمول تحت آبخستگی قرار گرفته و پس از گذشت مدت زمان مشخص به حالت تعادل رسیده و در عمل عمق گودال افزایش پیدا نمی‌کند. در نبودن ایستگاه‌های آب‌سنجی در مقطع پل‌ها مقدار این آبخستگی اولیه مشخص نبوده و فرض بر آن شده که این مقدار صفر است. اما می‌توان عمق آبخستگی ناشی از سیلاب‌های مختلف با در نظر گرفتن آبخستگی اولیه فرضی محاسبه کرد. پایه‌های شماره سه، چهار و پنج پل مجتمع تجاری نشان داده شده در شکل ۷ در آبراهه اصلی رودخانه اصلی (سقز) قرار دارند. نتایج عمق آبخستگی محاسبه توسط معادله‌های نرم‌افزار این پایه‌ها برای دبی‌های مختلف و پیش‌فرض‌های تعریفی در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ قابل مشاهده است. عمق آبخستگی موضعی پایه‌های شماره ۳، ۴ و ۵ با افزایش مقدار دبی جریان افزایش یافته است. نمودار نتایج شکل‌های ۱۶ و ۱۸ نشان داد که مقدار ۲/۴۳ و ۲/۰۸ (دبی ۱۰ ساله) نسبت سرعت جریان بر آستانه به ترتیب برای پایه‌های شماره ۳ و ۵ نقطه عطفی برای افزایش تاثیر وجود شاخه نسبت به انباشت جسم‌های شناور بر عمق آبخستگی است. نتایج آبخستگی پایه‌های واقع در آبراهه اصلی با افزایش V/V_c از مقدار ۲/۹۱ تا ۳/۴۷ (از دبی ۲۵ تا ۲۰۰ ساله) نشان داد وجود شاخه به‌طور میانگین باعث افزایش ۴/۶۷ درصدی عمق آبخستگی شده است. انباشت جسم‌های شناور در بالادست پل مقدار عمق آبخستگی موضعی را نزدیک به ۱/۳۸ درصد افزایش داده است. به همین دلیل اثر افزایش مقدار دبی جریان بر عمق آبخستگی موضعی پایه‌های پل بیشتر از انباشت مواد شناور است. جدول‌های ۳ و ۴ به‌طور کامل نتایج عمق آبخستگی پایه‌های پل را برای دبی با دوره‌های بازگشت مختلف با روش‌های CSU و فرولیچ نشان داده است. شکل ۱۹ نیم‌رخ عرضی آبخستگی ناشی از دبی سیلاب ۲۰۰ ساله در نرم‌افزار HEC-RAS به روش CSU نشان می‌دهد.

شده است. شاخه برای V/V_c بزرگ‌تر از ۲/۲۴ (دبی ۵ ساله) تاثیر بیشتری نسبت به انباشت جسم‌های شناور بر افزایش عمق آبخستگی موضعی پایه شماره ۲ داشته است.

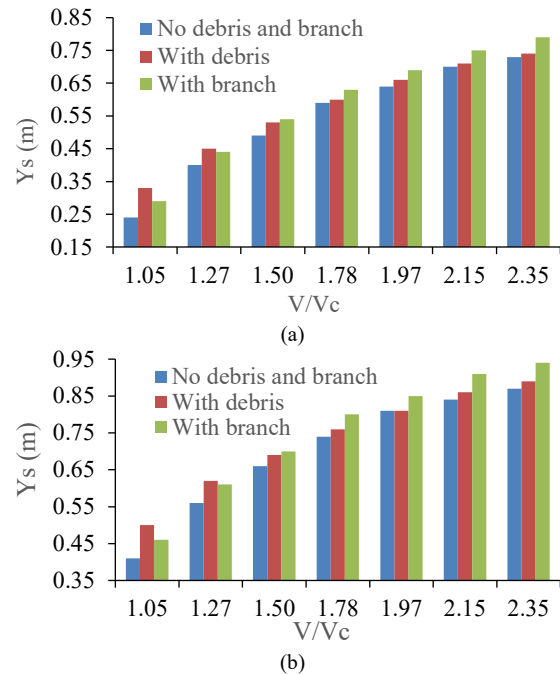


Fig 14 Scouring depth of Pier No.1: a) Froehlich equation's and b) CSU equation's

شکل ۱۴ عمق آبخستگی پایه شماره یک: (a) معادله فرولیچ و (b) معادله CSU

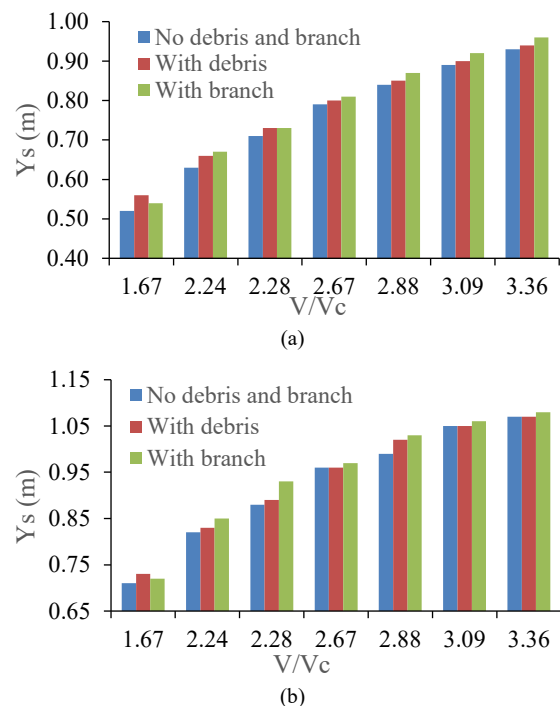


Fig. 15 Scouring depth of Pier No.2: a) Froehlich equation's and b) CSU equation's

شکل ۱۵ عمق آبخستگی پایه شماره دو: (a) معادله فرولیچ و (b) معادله CSU

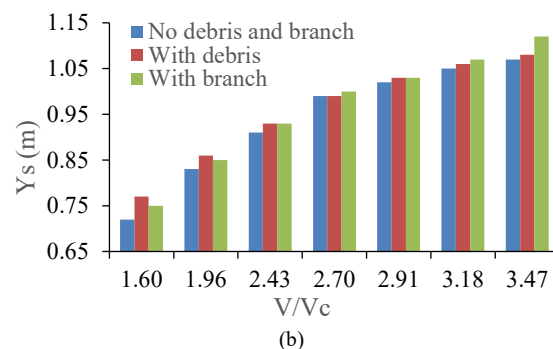
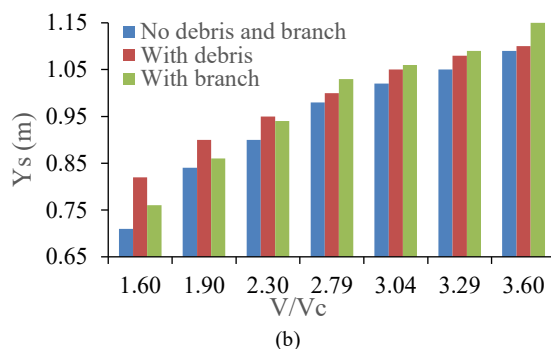
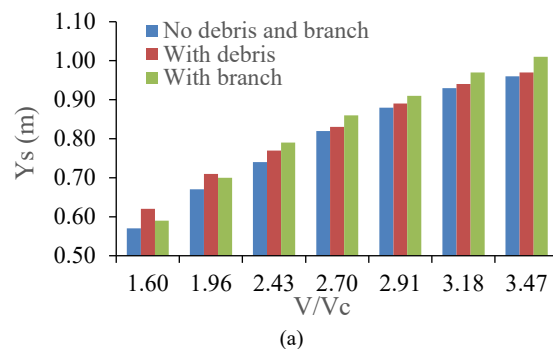
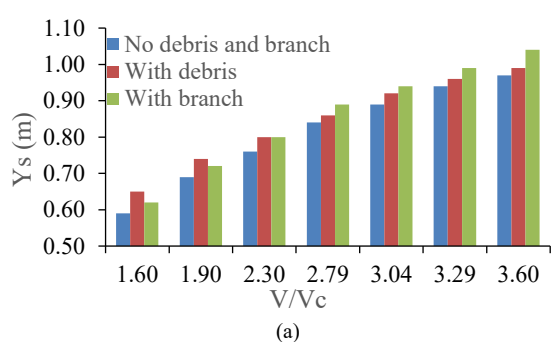


Fig 17 Scouring depth of Pier No.4: a) Froehlich equation's and b) CSU equation's
 شکل ۱۷ عمق آبستگي پایه شماره چهار: (a) معادله فرولیچ و معادله (b) CSU

Fig 16 Scouring depth of Pier No.3: a) Froehlich equation's and b) CSU equation's
 شکل ۱۶ عمق آبستگي پایه شماره سه: (a) معادله فرولیچ و معادله (b) CSU

جدول ۳ نتایج آبستگي پایه‌ها پل با استفاده از معادله فرولیچ

Table 3 The results of scouring piers of the froehlich equation

		Time (Years)						
		2	5	10	25	50	100	200
No debris and branch (m)	Pier No.1	0.24	0.4	0.49	0.59	0.64	0.7	0.73
	Pier No.2	0.52	0.63	0.71	0.79	0.84	0.89	0.93
	Pier No.3	0.57	0.67	0.74	0.82	0.88	0.93	0.96
	Pier No.4	0.59	0.69	0.76	0.84	0.89	0.94	0.97
	Pier No.5	0.56	0.66	0.73	0.81	0.87	0.92	0.95
With branch (m)	Pier No.1	0.29	0.44	0.54	0.63	0.69	0.75	0.79
	Pier No.2	0.54	0.67	0.73	0.81	0.87	0.92	0.96
	Pier No.3	0.59	0.7	0.79	0.86	0.91	0.97	1.01
	Pier No.4	0.62	0.72	0.8	0.89	0.94	0.99	1.04
	Pier No.5	0.59	0.69	0.77	0.85	0.91	0.96	1.01
With debris (m)	Pier No.1	0.33	0.45	0.53	0.6	0.66	0.71	0.74
	Pier No.2	0.56	0.66	0.73	0.8	0.85	0.9	0.94
	Pier No.3	0.62	0.71	0.77	0.83	0.89	0.94	0.97
	Pier No.4	0.65	0.74	0.8	0.86	0.92	0.96	0.99
	Pier No.5	0.61	0.7	0.77	0.83	0.88	0.93	0.96

جدول ۴ نتایج آبخستگی پایه‌ها با استفاده از معادله CSU

Table 4 The results of scouring piers of the CSU equation

		Time (Years)						
		2	5	10	25	50	100	200
No debris and branch	Pier No.1	0.41	0.56	0.66	0.74	0.81	0.84	0.87
	Pier No.2	0.71	0.82	0.88	0.96	0.99	1.05	1.07
	Pier No.3	0.72	0.83	0.91	0.99	1.02	1.05	1.07
	Pier No.4	0.71	0.84	0.9	0.98	1.02	1.05	1.09
	Pier No.5	0.69	0.82	0.89	0.97	1.01	1.04	1.06
With branch	Pier No.1	0.46	0.61	0.7	0.8	0.85	0.91	0.94
	Pier No.2	0.72	0.85	0.93	0.97	1.03	1.06	1.08
	Pier No.3	0.75	0.85	0.93	1	1.03	1.07	1.12
	Pier No.4	0.76	0.86	0.94	1.03	1.06	1.09	1.15
	Pier No.5	0.75	0.84	0.93	0.99	1.04	1.09	1.12
With debris	Pier No.1	0.5	0.62	0.69	0.76	0.81	0.86	0.89
	Pier No.2	0.73	0.83	0.89	0.96	1.02	1.05	1.07
	Pier No.3	0.77	0.86	0.93	0.99	1.03	1.06	1.08
	Pier No.4	0.82	0.9	0.95	1	1.05	1.08	1.1
	Pier No.5	0.77	0.85	0.93	0.99	1.02	1.05	1.07

دو روش CSU و فرولیچ پرداخته شده است و مقدار آبخستگی موضعی پایه‌های پل به صورت جداگانه برای سه پیش فرض وجود انباشت جسم‌های شناور، وجود شاخه فرعی و حالت طبیعی بررسی و تحلیل شد. نتایج نشان داد برای هر سه حالت مدنظر مقدار عمق آبخستگی موضعی برای دبی ۲۰۰ ساله در اثر وجود شاخه فرعی برای پایه‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب ۰/۹۴، ۱/۰۸، ۱/۱۲، ۱/۱۵ و ۱/۱۲ است. برابر این نتایج عمق آبخستگی موضعی پایه‌های ساحل‌های کناری (پایه‌های شماره ۱ و ۲) کمتر از پایه‌های واقع در آبراهه اصلی (پایه‌های شماره ۳، ۴ و ۵) است. همچنین پایه شماره ۱ کمترین مقدار را در بین پایه‌ها دارد. ترتیب بزرگی عمق گودال آبخستگی موضعی برای سیلاب‌های مختلف به صورت پایه‌های شماره ۴، ۳، ۵، ۲ و ۱ است. بیشینه عمق آبخستگی موضعی در حالت وجود شاخه و دبی ۲۰۰ ساله رخ داده و برای پایه شماره ۴ است. مقدار آن توسط معادله CSU ۱/۱۵ متر محاسبه شده ولی معادله فرولیچ مقدار عمق را ۱/۰۴ متر محاسبه کرده است.

بیشترین درصد افزایش عمق آبخستگی برای همه‌ی پایه‌ها در حالت وجود انباشت جسم‌های شناور بوده است. این افزایش برای سیلاب ۲ ساله رخ داده است، میانگین آن

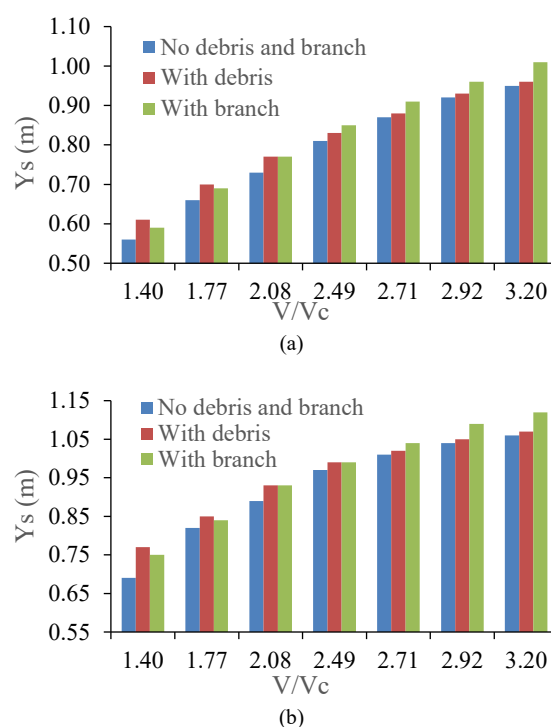


Fig 18 Scouring depth of Pier No.5: a) Froehlich equation's and b) CSU equation's

شکل ۱۸ عمق آبخستگی پایه شماره پنج: (a) معادله فرولیچ و (b) معادله CSU

۴- نتیجه گیری

همان گونه که بیان شد در این پژوهش به بررسی آبخستگی موضعی پایه‌های پل رودخانه سقز با استفاده از

نتایج به دست آمده از هر دو معادله CSU و فرولیچ دارای اختلاف هستند. با در نظر گرفتن سیلاب‌های مختلف و همه‌ی پایه‌ها به صورت کلی نتایج معادله CSU بزرگ‌تر از معادله فرولیچ است. میانگین درصد بیشتر بودن نتایج معادله CSU نسبت به نتایج رابطه فرولیچ برای حالت طبیعی ۲۲ درصد و برای هر دو حالت دیگر ۲۱ درصد شده است. اما برای مثال پایه شماره ۴ در دبی ۲۰۰ ساله که بیشترین مقدار عمق آبشستگی در پیرامون این پایه رخ داده است. اختلاف نتایج بین معادلات CSU و فرولیچ برای حالت طبیعی، تنها وجود شاخه و انباشت جسم‌های شناور به ترتیب نزدیک به ۱۱، ۹/۵۶ و ۱۰ درصد است. با توجه به ماهیت رابطه CSU این معادله قابل اطمینان تر می‌تواند باشد، زیرا اثرگذاری‌های زاویه برخورد جریان، شکل پایه، شرایط ذرات بستر و ضریب احتمال تشکیل لایه سپر را در نظر می‌گیرد.

۵- منابع‌ها

Azizi, R. & Shafai, B.M. (2023). Sensitivity Analysis of Effective Parameters in Empirical Equations for Estimating Local Scour Depth at Bridge Piers in Steady Flows. *J. Water and Soil Science*, 33(3), 231-252. (In Persian)

Bento, M.A., Gomes, A., Viseu, T., Couto, L. & Pego, P. J. (2020). Risk-based methodology for scour analysis at bridge foundations. *J. Engineering Structures*, 223, 111115, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111115>.

Brunner, G.W. (2023). HEC-RAS, Hydrological Engineering Center-River Analysis System, Hydraulic Reference Manual (Version 6.4.1). US Army Corps of Engineers, USA.

Carnacina, L., Pagliara, S. & Nicoletta, L. (2019). Bridge pier scour under pressure flow conditions. *J. River Research and Applications*, 35(7), 844-854.

Daneshfaraz, R., Dasineh, M. & Ghaderi, A. (2019). Evaluation of scour depth around bridge piers with HEC-RAS (Case study: Bridge of Simineh Rood, Miandoab, Iran). *J. Environ. Water Eng.*, 5(2), 91-102. (In Persian)

Dey, S. (2014). *Fluvial Hydrodynamics*. Springer, Verlag Berlin Heidelberg. 706p. DOI: 10.1007/978-3-642-19062-9.

Eshaghian, M., Gohari, S. & Okhravi, S. (2019). Single Bridge Pier Scour in Uniform and Non-

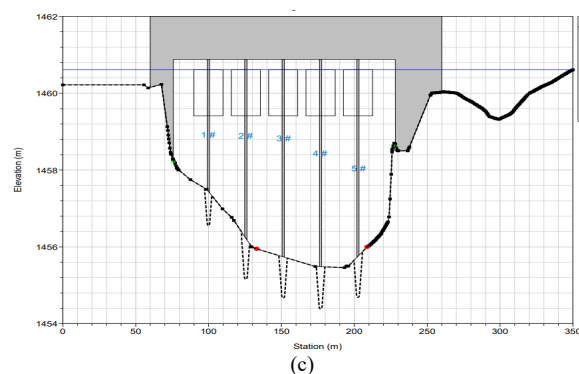
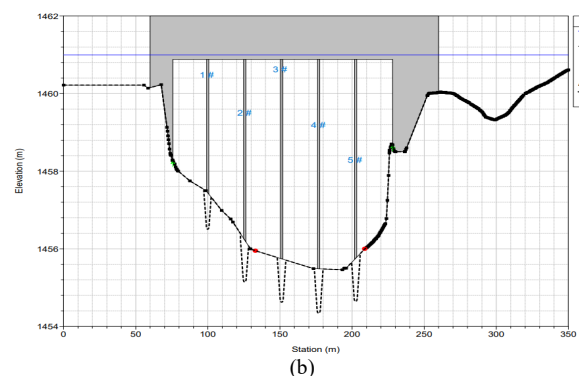
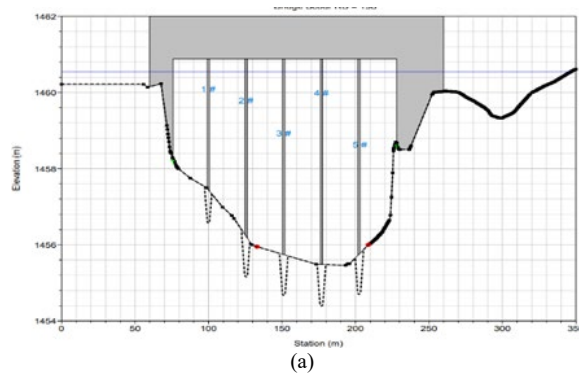


Fig 19 The scour depth results of the CSU equation for a 200year flood: a) No branch and debris, b) With branch and c) With debris

شکل ۱۹ عمق آبشستگی ناشی از سیلاب ۲۰۰ ساله به روش CSU (a) : حالت طبیعی، (b) تنها شاخه و (c) تنها انباشت جسم‌های شناور

برای پایه‌های شماره ۱ و ۲ در معادله فرولیچ ۲۳ درصد و برای معادله CSU ۱۲ درصد بوده است. به طور کلی برای پایه‌های میانی این مقدار افزایش عمق آبشستگی ناشی از تجمع جسم‌های شناور در حدود ۱۰ درصد شده است. اثر انباشت جسم‌های شناور بر تشدید عمق چاله آبشستگی با افزایش دبی جریان کمتر شده است. به طوری که در دبی ۲۰۰ ساله با توجه به نتایج هر دو معادله مقدار عمیق شدن گودال آبشستگی بین ۱ تا ۲ درصد بوده است.

- Parola, C.A. (2000). Debris Forces on Highway Bridges. NCHRP Report 445., Washington. 90p.
- Pizarro, A., Manfreda, S. & Tubaldi, E. (2020). The Science behind Scour at Bridge Foundations: A Review. *Water*, 12(2), 374, <https://doi.org/10.3390/w12020374>.
- Pournazeri, S., Haghghat, F. & Li, S.S. (2014). A bridge pier scour model with non-uniform sediments. *J. Water Management*, 167(9), 499-511.
- Rahimi, E., Qaderi, K., Rahimpour, M., Ahmadi, M.M. & Madadi, R.M. (2020). Scour at side by side pier and abutment with debris accumulation. *J. Marine Georesources & Geotechnology*, 39(4), 459-470.
- Rahimi, E., Qaderi, K., Rahimpour, M. & Ahmadi, M.M. (2018). Effect of Debris on Piers Group Scour: An Experimental Study. *KSCE J. Civil Engineering*, 22, 1496-1505.
- Saha, R., Lee, O. S., and Hong, H. S. (2018). A Comprehensive Method of Calculating Maximum Bridge Scour Depth. *Water*, 10(11), 1572, <https://doi.org/10.3390/w10111572>.
- Shahriar, R.A., Ortiz, C.A., Montoya, M.B. & Gabr, A.M. (2021). Bridge Pier Scour: An overview of factors affecting the phenomenon and comparative evaluation of selected models. *J. Transportation Geotechnics*, 28, 100549, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100549>.
- Yu, P. & Zhu, L. (2020). Numerical simulation of local scour around bridge piers using novel inlet turbulent boundary conditions. *J. Ocean Engineering*, 218, 108166, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108166>.
- uniform Sediment Beds Under Steady and Unsteady Flow. *J. Hydraulics*, 14(1), 1-17. (In Persian).
- Ghosh, A., Roy, B.M., Roy, K.P. & Mukherjee, S. (2021). Assessing the nature of sediment transport with bridge scour by 1D sediment transport model in the sub-catchment basin of Bhagirathi–Hooghly River. *J. Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 2823-2845.
- Lagasse, F.P., Clopper, E.P., Zevenbergen, W.L., Spitz, J.W. & Girard, G.L. (2010). Effects of Debris on Bridge Pier Scour. NCHRP Report 653., Washington. 177p.
- Li, J., Zhang, B., Shen, C., Fu, X. & Li, W. (2021). Experimental Study on Local Scour Depth around Monopile Foundation in Combined Waves and Current. *J. Sustainability*, 13(24), 13614, <https://doi.org/10.3390/su132413614>.
- Liang, F., Wang, C. & Yu, X. (2019). Performance of Existing Methods for Estimation and Mitigation of Local Scour around Bridges: Case Studies. *J. Perform. Constr. Facil.*, 33(6), 04019060, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001329](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001329).
- Najafzadeh M. & Mahmaudi-Rad M. (2019). Estimation of the maximum scour depth at bridge pier under effects of debris accumulations using NF-GMDH model and evolutionary algorithms. *J. Environ. Water Eng.*, 5(3), 213–225.
- Omara, H., Abdeelaal, M.G., Nadaoka, K. & Tawfik, A. (2019). Developing empirical formulas for assessing the scour of vertical and inclined piers. *J. Marine Georesources & Geotechnology*, 38(2), 133-143.
- Panici, D., Kripakaran, P., Djordjevic, S. & Dentith, K. (2020). A practical method to assess risks from large wood debris accumulations at bridge piers. *J. Science of the Total Environment*, 728, 138575, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138575.

© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



