

# بررسی عددی پدیده‌های برگشت آب و پرش هیدرولیکی در پل‌های تاریخی

بابک خیاط رستمی<sup>۱\*</sup>، یوسف حسن زاده<sup>۲</sup>، سیامک خیاط رستمی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد عمران- سازه‌های هیدرولیکی، گروه تحقیقات، شرکت آب منطقه ای اردبیل

۲- استاد دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه محقق اردبیلی

\* b.khajatrostami@arrw.ir

تاریخ پذیرش: [۹۴/۱۰/۲۷]

تاریخ دریافت: [۹۴/۰۵/۲۹]

## چکیده-

قرار گرفتن پل در آبراهه، مشخصات جریان را تغییر می‌دهد. بیشتر این تغییرات از جزئیات هندسی پل ناشی می‌شوند. در معماری پل‌های تاریخی، قوس‌های نیمدایره و جناغی به عنوان هندسه دهانه به کار رفته است. پل‌های تاریخی میراث ارزشمندی هستند که شناخت آنها از جنبه تداوم فرهنگی اهمیت دارد. در این پژوهش، تاثیر سه هندسه دهانه مستطیلی، نیمدایره و جناغی بر پدیده‌های برگشت آب و پرش هیدرولیکی تحت شرایط جریان سطح آزاد و نیمه مستغرق با نرم‌افزار Flow-3D مدل‌سازی عددی شد. کارایی Flow-3D با استفاده از نتایج تجربی به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بیرمنگام روی مدل پل دو دهانه با هندسه نیمدایره در کانال مرکب ارزیابی شد. تعیین موقعیت سطح آزاد با روش VOF و مدل‌سازی آشفتگی با روش K-ε دو معادله‌ای انجام پذیرفت. یافته‌ها نشان داد که هندسه نیمدایره از نظر میزان ایجاد خیزاب و تخریب ناشی از پرش هیدرولیکی در بستر، بر هندسه جناغی برتری دارد. گذشته از عوامل سازه‌ای و روش‌های اجراء، یافته‌های این پژوهش را می‌توان یکی از علل هیدرولیکی تحول هندسه دهانه از فرم جناغی به نیمدایره طی دوره صفویه تا قاجاریه دانست.

**واژگان کلیدی:** برگشت آب، پرش هیدرولیکی، Flow-3D، پل‌های تاریخی، هندسه دهانه

## ۱- مقدمه

و شناخت جامع آنها، زمینه حفظ تداوم فرهنگی و انتقال این میراث به نسل‌های بعد را فراهم می‌سازد. از آنجا که جنبه‌های معماری و مهندسی سازه‌های تاریخی در هم تنیده‌اند، مطالعه هیدرولیکی با هدف شناخت فلسفه طراحی پل‌های تاریخی می‌تواند مبنای طرح‌های مرمت و حفاظت و همچنین مستندسازی دانش بومی قرار گیرد. در این پژوهش، تاثیر تغییر هندسه دهانه پل از جناغی به نیمدایره شکل (۱) بر پدیده‌های برگشت آب و پرش هیدرولیکی بررسی شده تا میزان آگاهی تجربی معماران بومی از اندرکنش آب و سازه روشن شود.

بررسی آماری علل خرابی پل‌ها و سیل گرفتگی‌ها نشان می‌دهد که در دوران معاصر، ملاحظات هیدرولیکی به اندازه ملاحظات سازه‌ای در طراحی پل‌ها مورد توجه قرار نمی‌گیرد، در حالیکه معمار- مهندسین بومی در محدوده دانش فنی قرون گذشته، به جای تلاش برای «مهار» طبیعت به «سازگاری» با آن کوشیده و پل‌هایی ساخته‌اند که در موارد متعدد کارکرد خود را قرن‌ها حفظ نموده، حتی پس از آنکه کاربری آن عوض شده است. سازه‌های تاریخی جزو عناصر هویت بخش و نیازهای معنوی هر ملت بوده

شکل ۱. سیر تحول تاریخی هندسه قوس دهانه پل

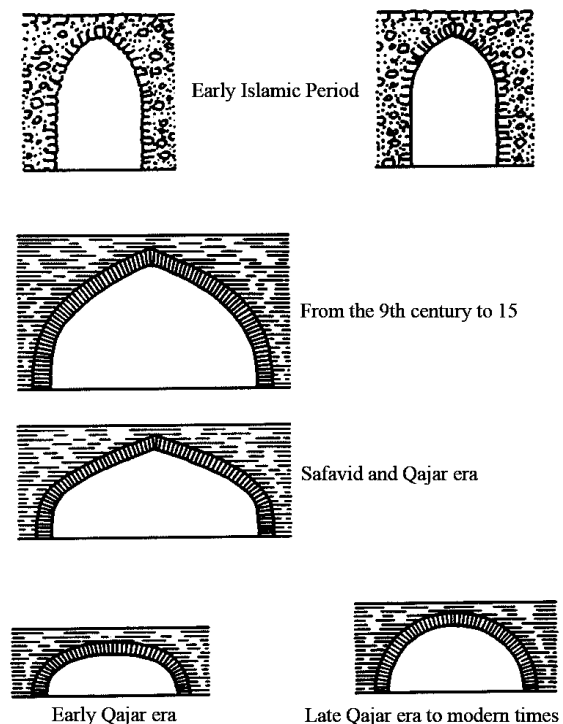


Fig. 1. Historical evolution of the bridge opening arch geometry

و با روش‌های مرسوم مورد مقایسه قرار گرفت [3]. قابلیت سه نوع از مدل آشفتگی در پل‌های با عرشه مستطیلی مستغرق با FLUENT بررسی شد [4].

پرش هیدرولیکی بیشتر یک جریان آشفته است که آشفتگی و نوسانات شدید فشار در محدوده غلطابی آن، نه تنها مصالح طبیعی کف آبراهه بلکه بلوک‌های بتنی بزرگ- که برای تثبیت بستر بکار می‌روند را نیز می‌تواند جابه‌جا و تخریب کند. طول پرش هیدرولیکی با زبری نسبت معکوس و با عدد فرود نسبت مستقیم دارد، همچنین تنش برشی با فواصل بین زبری و عدد فرود نسبت مستقیم دارد. توزیع تنش برشی در عمق کانال مستطیلی [5]، و در مجاورت مانع [6]، تاثیر شکل مقطع کانال روی توزیع تنش برشی در کانالهای روباز [7]، در کانال‌های با مقطع دایره‌ای نیمه پر [8]، و پدیده عمق گرفتگی<sup>۲</sup> در ناحیه میانی کانال مستقیم [9]، و در امتداد طولی آبراهه [10] بررسی شده است.

## ۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر حرکت سیال تراکم ناپذیر لزج در حال آشفته، به وسیله روابط ناویه- استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز (RANS) بیان می‌شوند. از آنجایی که جریان در دهانه پل و مجاورت پایه آشفته است، و نیز بر اساس تجربیات موجود [11]، در این پژوهش از مدل  $k-\epsilon$  دو معادله‌ای برای حل جریان آشفته استفاده شده است.

### ۲-۱- روابط برگشت آب

جریان بالادست به هنگام عبور از میان دهانه‌های پل، باید ابتدا فشرده و دوباره منبسط شود. برای جبران این افت بار انرژی، لازم است که سطح تراز آب در بالادست پل به اندازه‌ای افزایش یابد تا آب از میان دهانه‌های پل با حفظ پیوستگی جریان عبور نماید. مقدار ماکزیمم منحنی برگشت آب (افزایش تراز در مقطع  $D_1$  نسبت به شرایط نرمال در مقطع  $D_3$  در شکل (۲) تحت دو حالت کلی برآورد می‌شود:

(الف) شرایط دبی کم (زیر طاق) که جریان با سطح آزاد از دهانه پل عبور می‌کند. بیشتر روش‌های کلاسیک موجود برای

شکل‌گیری پروفیل برگشت آب در بالادست پل‌ها و مقدار بیشینه آن (خیزاب) نقش کلیدی در وسعت ناحیه سیل گرفته و خسارات وارد شده دارد. بسته به شرایط توپوگرافی حوضه آبریز، هر سانتی متر خیزاب چندین کیلومتر مربع بر این وسعت می‌افزاید. در زمان وقوع سیلاب‌های حادی که ارتفاع خیزاب می‌تواند حتی تا یک متر نیز برسد، اهمیت مساله بیشتر می‌شود. با وجود آنکه قوس جناغی<sup>۱</sup> در پل‌های اروپایی نیز استفاده شده است، هیچ مطالعه هیدرولیکی آزمایشگاهی و عددی در مورد آنها یافت نشد. مطالعات داخل کشور نیز بیشتر بر هندسه پایه و آبشکن متمرکز بوده و مطالعه سه بعدی جریان در دهانه‌های مستغرق تاکنون انجام نشده است؛ از جمله: پس‌زدگی جریان در اثر وجود پایه پل در جریان‌های زیر بحرانی با استفاده از مدل‌های تجربی و عددی مطالعه شد [1]. پدیده فرآب در پایه‌های پل به صورت عددی شبیه‌سازی شد [2]. فرآب ناشی از پایه پل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر تابع پایه شعاعی بررسی

1 - pointed or nested arch

2 - Dip Phenomenon

### ۳- مدلسازی در FLOW-3D

بنابر توصیه‌های موجود برای استفاده از مدل‌های دو بعدی و بالاتر در در مجاورت پل‌ها، نرم‌افزار Flow-3D برای این پژوهش حاضر انتخاب شد که برای حل صریح و ضمنی جریان غیردائمی در فضای سه بعدی، به همراه پنج مدل آشفتگی، توسعه داده شده است و از شبکه سلول‌های مستطیلی استفاده می‌کند. نرم‌افزار از دو تکنیک عددی برای شبیه‌سازی هندسی بهره می‌برد: (۱) روش حجم سیال (VOF) برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد؛ (۲) روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب، مانند مرزهای هندسی.

ابتدا مدل‌های پل دو دهانه (با سه شکل هندسی نیم‌دایره، جناغی و مستطیلی) واقع در یک کانال مستقیم با دو تراز ارتفاعی در محیط AutoCAD ترسیم شد (شکل ۳-الف). ابعاد مدل نیم‌دایره هماهنگ با مدل دو دهانه نیم‌دایره در آزمایشات دانشگاه بیرمنگام [18] انتخاب و ابعاد دو مدل دیگر به گونه‌ای تنظیم شد که مساحت دهانه در هر سه مدل مساوی باشد. پهنای عرشه، عرض و هندسه پایه نیز در هر سه مدل یکسان و طبق این آزمایش‌ها به ترتیب ۱/۸ و ۱۰ سانتی‌متر به شکل مستطیل (بدون آبشکن) تنظیم شد.

شکل ۳. الف- ابعاد مدل آبراهه و سه هندسه دهانه در مقایسه با یکدیگر، ب- فلوم دانشگاه بیرمنگام

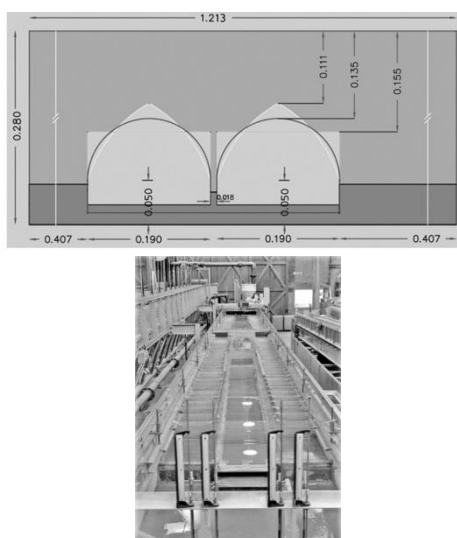


Fig. 3. (a) Comparative dimensions of the three opening geometries and waterway, (b) Birmingham University flume

این حالت در مورد پل‌های قوسی تاریخی کارایی ندارند. فرم کلی روابطی که برای دهانه‌های نیم‌دایره ارائه شده‌اند به صورت ذیل است:

$$dh/D_3 = f(Fr_3, J_3) \quad (4)$$

$D_3$  عمق نرمال آب در فقدان سازه (جریان یکنواخت و توسعه یافته)،  $Fr_3$  عدد فرود جریان در فقدان سازه در  $D_3$  و  $J_3$  نسبت انسداد جریان تحت تاثیر سازه (مساحت مسدود شده به وسیله پل در  $D_3$  تقسیم بر سطح مقطع جریان) است. (ب) شرایط دبی زیاد و استغراق دهانه، که فقط برای پل‌های تخت روابطی ارائه شده است.

شکل ۲. طرح شماتیک پروفیل سطح و برگشت آب در مجاورت دهانه پل

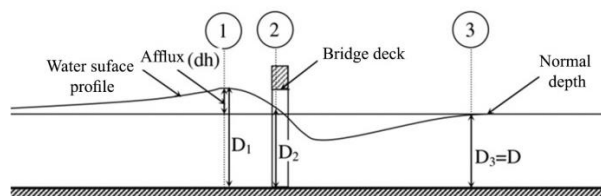


Fig. 2. Schematic profile of the water surface and backwater in vicinity of the bridge opening

### ۲-۲- روابط پرش هیدرولیکی

یکی از مشخصات مهم پرش هیدرولیکی که از نقطه نظر طراحی اهمیت دارد طول آن است. طول پرش در حالت کلی قابل محاسبه از طریق تحلیل‌های ریاضی نبوده، در هر مورد باید به صورت تجربی مطالعه شود [12]. رابطه‌ای برای محاسبه طول پرش در دهانه پل‌ها مشاهده نشد. در آشفتگی ناحیه غلطابی پرش، جریان‌های ثانویه ناشی از تنش برشی شکل می‌گیرند که از نظر کف کنی و رسوبگذاری شایان توجه است [13]. تنش برشی آشفته (تنش‌های رینولدز) [14] تخمین مناسبی از تنش برشی وارد بر کف در جریان‌های پیچیده است [15]. تنش برشی بحرانی، حدی از تنش برشی مرزی است که نیروی هیدرودینامیک کافی برای غلبه بر تعادل یک ذره مشخص را تامین نماید. نوسانات شدید سرعت و تنش‌های رینولدز به میزان یک تا دو برابر تنش بحرانی حین پرش هیدرولیکی گزارش شده است [16]. تنش برشی بستر را می‌توان به کمک سرعت میانگین‌گیری شده در عمق محاسبه نمود [17].

### ۳-۱- شبکه بندی و شرایط مرزی

بالادست و پروفیل پایاب با دقت ۰/۱ میلی‌متر و در فواصل یک متری ثبت شد. از آنجا که امکان استغراق دهانه‌های پل در محدوده دبی‌های آزمایش‌ها بیرمگام وجود نداشت، برنامه‌ای در محیط MATLAB نوشته شد که امکان برونیابی دبی و محاسبه عمق نرمال و عدد فرود متناظر در کانال مرکب مورد نظر را فراهم می‌نمود. درستی عملکرد برنامه مذکور با دبی‌های آزمایشگاهی کنترل و دبی‌های برونیابی شده (۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه) برای مطالعه شرایط استغراق استفاده شدند. در مرحله درستی‌آزمایی، خیزاب محاسباتی مدل نیمدایره با خیزاب آزمایشگاهی مقایسه جدول (۱). مشاهده می‌شود که در دبی‌های پائین‌تر که امکان شکل‌گیری جریان‌های کم عمق (در مقایسه با دقت مش بندی) روی سیلابدشت وجود دارد خطای بیشتر و در دبی‌های بالاتر خطای کمتری بوجود می‌آید. در مجموع، خطاها در محدوده قابل قبولی قرار دارند.

پس از ساختن هندسه در محیط نرم‌افزار، مش‌بندی انجام می‌گیرد. ابتدا تحلیل حساسیت نسبت به مش‌بندی یکنواخت ۱ و ۲ سانتی‌متری در امتداد محور طولی انجام شد که با مقایسه دقت و مدت شبیه‌سازی‌ها، مش بندی غیر یکنواخت انتخاب شد؛ به گونه‌ای که بعد طولی سلول‌ها در مجاورت پل تا یک متری بالادست ۱ سانتی‌متر و در سایر نواحی ۲ سانتی متر باشد. در بعد عرضی، تعداد سلول‌های آبراهه اصلی بیشتر از سیلابدشت و در بعد ارتفاعی نیز با توجه به بیشینه رقوم سطح آب انتخاب و ابعاد دامنه محاسباتی به ترتیب ۹۵۰ سلول در طول، ۱۰۰ سلول در عرض و ۲۶ تا ۴۰ سلول در ارتفاع تعیین شد. در مرز ورودی، دبی آزمایشگاهی و عمق نرمال متناظر آن، در مرز خروجی عمق نرمال آزمایشگاهی در فقدان پل، در مرز کف و جناحین شرط دیواره، و در سطح آزاد دامنه محاسباتی نیز شرط تقارن قرار داده شد شکل (۴). سپس ۲۷ مدل‌سازی با شرط حصول جریان دائمی به انجام رسید.

جدول ۱. درستی آزمایی خیزاب مدل نیمدایره با داده‌های آزمایشگاهی

Error (percent)	Calculated afflux (m)	Lab afflux (m)	Lab discharge (lit/sec)
2.9	0.0719	0.0699	35
2.1	0.0564	0.0576	30
2.4	0.0519	0.0507	27
7.2	0.0459	0.0428	24
7.5	0.0374	0.0348	21

Table 1. Verification of the semicircular model with lab data

شکل ۴. شرایط مرزی دامنه محاسباتی

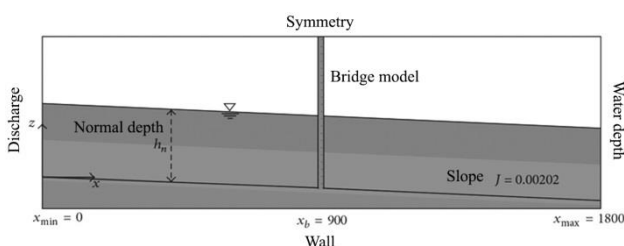


Fig. 4. Boundary conditions of the computational domain

شکل ۵. پروفیل برگشت آب در بالادست و پرش هیدرولیکی در پائین

دست دهانه مستطیلی (دبی ۴۵ لیتر بر ثانیه)

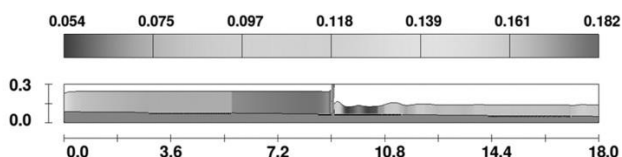


Fig. 5. Upstream backwater profile and downstream hydraulic jump

### ۴- مدل آزمایشگاهی

در آزمایش‌ها دانشگاه بیرمگام [18] یک کانال مرکب متقارن با زبری مصنوعی ۰/۰۱ در فلوم آزمایشگاهی به ترتیب با طول ۲۲، عرض ۱/۲۱۳، عمق ۰/۴ متر، شیب کف ۰/۰۰۲۰۲ و دیواره‌های عمودی ایجاد شد شکل (۳-ب). برای محاسبه عمق نرمال، جریان زیربحرانی و یکنواخت با پنج دبی (۲۱، ۲۴، ۲۷، ۳۰ و ۳۵ لیتر بر ثانیه) در کانال بدون مانع برقرار و عمق آن پس از رسیدن جریان به حالت دائمی ثبت شد. سپس مدل‌های کوچک پل با هندسه دهانه نیمدایره، نیم بیضوی و تخت از جنس PVC به عرض ۱۰ سانتی‌متر در وسط کانال تعبیه و پس از برقراری جریان دائمی، عمق برگشت آب در

### ۵- یافته‌ها

استخراج مقادیر خیزاب از پروفیل‌های طولی شکل (۵) صورت می‌گیرد. در کلیه مدل‌ها، محل خیزاب در فاصله‌ای معادل با ۰/۰۸ برابر نسبت خیزاب به عرض پایه تشکیل می‌شود. خیزاب هندسه‌های مختلف تحت شرایط دبی کم و زیاد در شکل (۶) و رابطه بین خیزاب و عدد فرود پائین دست

شده جریان (در وسط یک دهانه) و عدد فرود متناظر آنها شکل (۸)، مشاهده شد که نقطه شروع پرش در مدل مستطیلی نزدیکتر به دهانه و در مدل جناغی دورتر از دهانه قرار می‌گیرد و در دهانه نیمدایره حالت بینابین دارد. نمودار طول پرش برای سه هندسه مختلف دهانه در شکل (۹) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در محدوده دبی‌های کم، به جز دبی ۲۱ لیتر بر ثانیه که فقط پایه بر جریان تاثیرگذار بوده و جریان‌های کم عمق روی سیلابدشت شکل می‌گیرند، و نیز دبی ۳۵ لیتر بر ثانیه که دهانه‌ها به استغراق نزدیک شده و انقباض عمودی جریان خود را نشان می‌دهد، طول پرش در هندسه جناغی بیشتر و در هندسه مستطیلی کمتر و در هندسه نیمدایره مقادیر بینابین دارد.

همچنین در محدوده دبی‌های زیاد، طول پرش در هندسه جناغی کمتر و در هندسه مستطیلی بیشتر و در هندسه نیمدایره بینابین است. نرم افزار Flow-3D می‌تواند تنش برشی بحرانی را مستقیماً محاسبه نماید. با در نظر گرفتن بازه یک متری بالادست پل تا مرز خروجی، مشاهده شد که این تنش در سه ناحیه از امتداد طولی وسط دهانه به میزان اکسترمم می‌رسد: (۱) در مجاورت پایه منفرد؛ (۲) نزدیک به انتهای دامنه، که در اثر شرط مرزی خروجی پدید می‌آید و جنبه فیزیکی ندارد. (۳) در ناحیه غلطابی پرش هیدرولیکی، که مقادیر محاسبه شده در شکل (۱۰) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در کلیه دبی‌ها، پرش هیدرولیکی در دهانه پل با هندسه جناغی بیشترین و در هندسه مستطیلی کمترین تنش برشی را در محدوده غلطابی تولید می‌کند (شکل ۱۱).

برای سه هندسه در شکل (۷) ارایه شده است. در کلیه مدل‌ها، چه در دبی‌های کم و چه دبی‌های زیاد، هندسه جناغی موجب پیشینه خیزاب می‌شود. پس از نقطه نظر کنترل وسعت سیل‌گرفتگی در حوضه بالادست، هندسه‌های مستطیلی و نیمدایره به ترتیب بر آن ارجحیت دارند. ابتدای پرش، نقطه کمینه عمق آب در وسط یک دهانه پل و انتهای آن، نقطه ای بعد از آخرین موج غلطان در نظر گرفته شد که عمق جریان تقریباً  $(\pm 0.05)$  با عمق پایاب برابر می‌شود.

شکل ۶. مقایسه خیزاب ناشی از سه هندسه دهانه در دبی‌های زیاد (بالا) و دبی‌های کم (پایین)

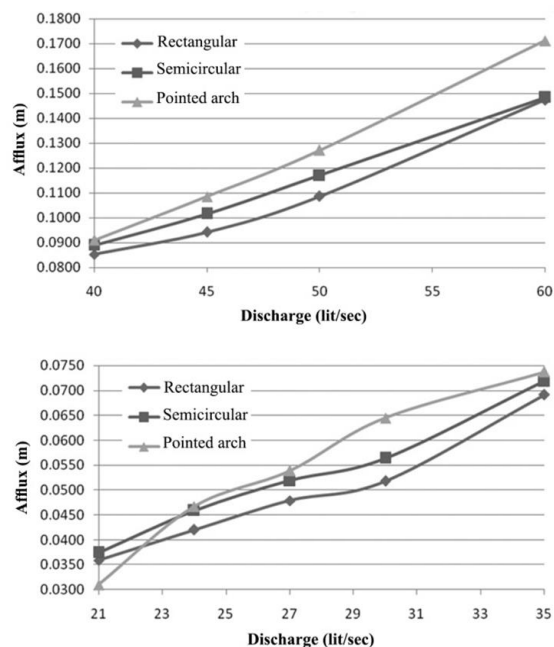


Fig. 6. Comparison of the afflux due to the three opening geometries for (top) High flows and (down) Low flows پس از استخراج ابتدا و انتهای پرش از پروفیل‌های طولی مدل‌سازی

شکل ۷. رابطه بین خیزاب و عدد فرود پائین دست برای هندسه مستطیلی (راست)، نیمدایره (وسط)، جناغی (چپ)

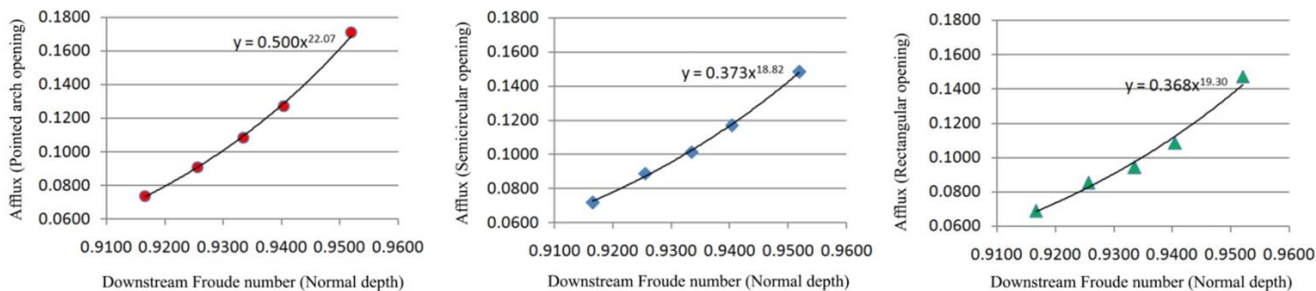


Fig. 7. Afflux and downstream Froude number relation for (right) rectangular, (center) semicircular, (left) pointed arch geometry

شکل ۸. تغییرات عدد فرود در وسط دهانه نیمدایره در دبی‌های کم، خط چین  $Fr = 1$  را نشان می‌دهد.

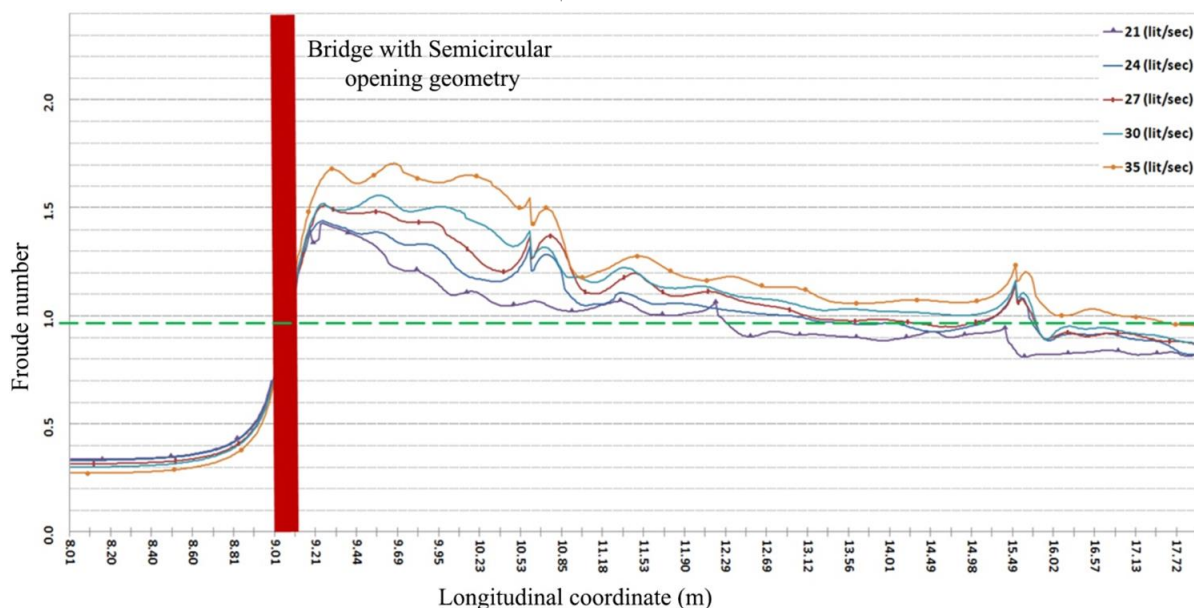


Fig. 8. Oscillations of the Froude number at the center of the semicircular opening for low flows.  $Fr=1$  shows critical Froude number

شکل ۹. طول پرش هیدرولیکی مستخرج از پروفیل‌های طولی مدل‌سازی شده در دبی‌های کم (راست) و دبی‌های زیاد (چپ)

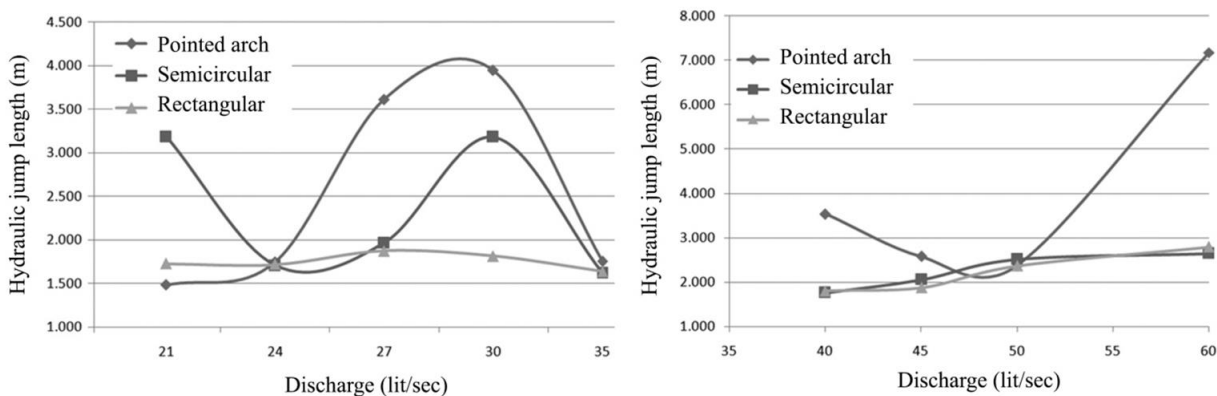
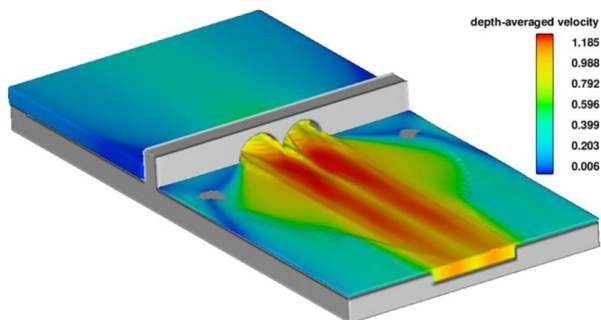


Fig. 9. Length of the hydraulic jump derived from longitudinal modeled profiles for (right) Low flows and (left) High flows

شکل ۱۱. توزیع سرعت میانگین‌گیری شده در عمق روی پروفیل سه بعدی جریان در دهانه با هندسه نیمدایره (بالا) و جناغی (پائین)



شکل ۱۰. مقایسه تنش برشی بحرانی در محدوده غلطایی پرش هیدرولیکی

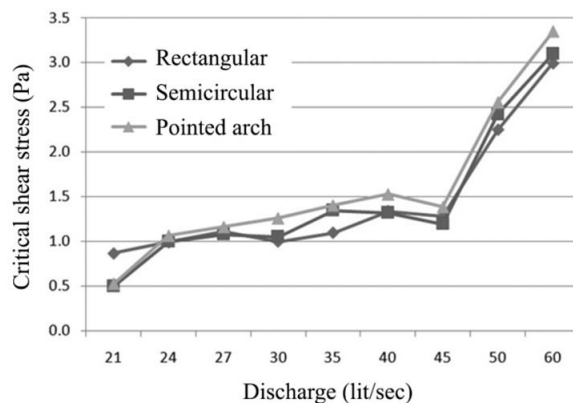


Fig. 10. Comparison of the critical shear stress at the roller region of hydraulic jump

36(3), 1387, Pp.15-22 (In Persian).

[3] Montazer Gh., Qhodsian M., Nasiri F., Javan M., Eqbalzadeh A., "Intelligent Prediction of the Afflux due to Bridge Pier Using Radial Basis Function ANN", *Modares Tech. and Engr. Journal*, 1382, 14, Pp. 49-62 (In Persian).

[4] Hamzei M., Eqbalzadeh M., Amini S.A., "Study of the Interaction of the Mean Flow Field around Submerged Bridge Deck with the Channel Bed and Free Surface", *Journal of Iranian Water Research*, 6(10), Pp. 67-74 (In Persian).

[5] Roussinova V., "Turbulent structures in smooth and rough open channel flows: effect of depth", *Electronic Thesis and Dissertations*, Paper 94, 2009.

[6] Prohaska S., Jancke T., Westrich B., "Model Based Estimation of Sediment Erosion in Groyne Fields Along the River Elbe", XXIVth Conference of the Danubian Countries, IOP Publishing, 2008.

[7] Mohamadi M.A., "The Effect of Channel Section Shape on the Shear Stress Distribution in the Free Channels", *Technical Faculty of Tabriz University Journal*, 29(3), 1382, Pp.53-64 (In Persian).

[7] Mohamadi M.A., "Wall Shear Stress the Channels with Partially Full Circular Section", *Technical Faculty of Tabriz University Journal*, 36(3), 1387, Pp.37-47 (In Persian).

[9] Rodriguez J.F., Garcia M.H., "Laboratory measurements of 3-D flow patterns and turbulence in straight open channel with rough bed", *Journal of Hydraulic Research*, 46(4), 2008, Pp: 454-465.

[10] Kirkgöz M., "Turbulent Velocity Profiles for Smooth and Rough Open Channel Flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(11), 1989, Pp: 1543-1561.

[11] Abo A., Greaves D., "A Three-Dimensional Flow Model for Different Cross-Section High-Velocity Channels", PhD thesis, Plymouth University, 2013.

[12] Zorratipour M., "Estimation of the Hydraulic Jump length and Determination of the Flow Surface Profile via Air Entrance Theory into the Hydraulic Jump and its Numerical Modeling", *Engineer's Message Journal*, 1390, (54), 54-61 (In Persian).

[13] Mohajeri S.H., Salehi Neyshabouri S.A., Safarzadeh A., "Experimental Study of the Turbulent Flow Pattern in the Straight Channel", 10<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conf., Guilan, 1390 61 (In Persian).

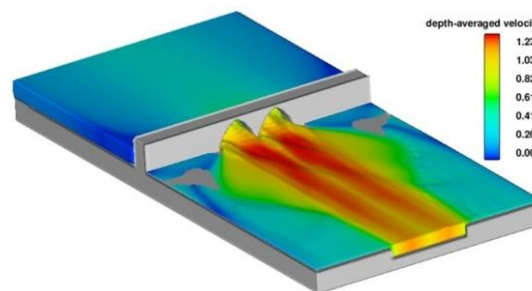
[14] Southard J., "Introduction to Fluid Motions, Sediment Transport, and Current-Generated Sedimentary Structures", MIT OpenCourseware, 2006.

[15] Mehraein M., Ghodsian.M. SalehiNeyshaboury. S.A.A., "Local Scour Due to Inclined Circular Wall Jet, Proceedings of ICE, *Journal of Water Management*", 164(3), 2011, Pp: 111-122.

[16] Chanson, H., "Turbulent Shear Stresses in Hydraulic Jumps and Decelerating Surges: An Experimental Study", *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(2), 2011, Pp: 180-189.

[17] Jia Y., Wang S., "CCHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model For Unsteady Open Channel Flow Over Loose Bed", Technical Report no. NCCHE-TR-2001-1, 2001.

[18] Atabay S, Knight D.W., "Bridge afflux experiments in compound channels", Technical paper presented for JBA Consulting Engineers & Scientists and the Environment Agency, 2002.



**Fig. 11.** Distribution of the depth-averaged velocity on the 3D flow profile at the (top) semicircular and (down) nested geometries

## ۶- نتیجه گیری

در معماری پل‌های تاریخی، قوس‌های نیم‌دایره و جناغی به عنوان هندسه دهانه به کار رفته است. در این پژوهش، تاثیر سه هندسه دهانه مستطیلی، نیم‌دایره و جناغی بر پدیده‌های برگشت آب و پرش هیدرولیکی تحت شرایط جریان سطح آزاد و نیمه مستغرق با نرم‌افزار Flow-3D مدل‌سازی عددی شد.

در کلیه مدل‌ها، هندسه دهانه جناغی موجب حداکثر خیزاب می‌شود و هندسه‌های مستطیلی و نیم‌دایره به ترتیب بر آن ارجحیت دارند. در محدوده دبی‌های زیاد، طول پرش در هندسه جناغی کمترین و در هندسه مستطیلی بیشترین و در هندسه نیم‌دایره مقادیر بینابین دارد. پرش هیدرولیکی در هندسه جناغی بیشترین و هندسه مستطیلی کمترین تنش برشی بحرانی را در محدوده غلطابی تولید می‌کند. مجموعه نتایج نشان می‌دهد که از بین دو هندسه دهانه رایج در پل‌های تاریخی، هندسه جناغی از نظر ایجاد خیزاب منجر به سیل‌گرفتگی و نیز فرسایش بستر در ناحیه غلطابی پرش هیدرولیکی، مزیت کمتری نسبت به هندسه نیم‌دایره دارد. گذشته از علل سازه‌ای و پیشرفت روش‌های اجراء، این یافته‌ها را می‌توان دلیل هیدرولیکی تحول هندسه جناغی به نیم‌دایره از دوره صفویه به دوره قاجاریه دانست، که معماران بومی با انتقال سینه به سینه تجربیات پل‌سازی طی پنج قرن بدان دست یافتند.

## References

## ۷- مراجع

- [1] Kariminia A., Salehi Neyshabouri S.A., "Numerical Simulation of the Afflux Phenomena in Bridge Piers", *Journal of Civil Engr. And Survey (Tech. Faculty)*, 5(4), 1390, Pp. 487-493 (In Persian).
- [2] Hassanzadeh Y., Hakimzadeh H., Alami M., Sarveram H., "Study of Flow Backwater due to the Bridge Pier in Subcritical Flows by the Experimental and Numerical Models", *Technical Faculty of Tabriz University Journal*,

# Numerical Study of Backwater and Hydraulic Jump Phenomena in Historical Bridges

B. Khaiatrostami<sup>1\*</sup>, Y. Hassanzadeh<sup>2</sup>, S. Khaiatrostami<sup>3</sup>

1- M.Sc., Civil-Hydraulic Engineering, Research Department, Ardabil Regional Water Company, Iran

2- Prof., Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran

3- M.Sc. Student, Civil-Hydraulic Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

\* b.khaiatrostami@arrw.ir

## Abstract:

Establishing a bridge in a waterway changes flow characteristics and emerges phenomena like three dimensional flow, turbulent flow, variation of the shear stress, variation of the channel conveyance etc. Most of these changes derive from geometric details of bridge, of which the opening geometry is one of the most important factors. Circular and pointed (nested) arches have been used as opening geometry in historical bridges for centuries. Historical bridges are valuable heritage and protection of them is important because of cultural continuity and knowing native knowledge. In this research, the effect of three bridge opening geometry on backwater and hydraulic jump phenomena was numerically studied by Flow-3D software (version 10). Flow-3D is a famous commercial CFD package with explicit and implicit solvers and five turbulence models. It solves Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) equations via Volume of Fluid (VOF) method as a Finite Difference formulation. In this research bridge models are located in the middle of an 18-meter-long compound channel. This compound channel resembles a waterway in a symmetric flood plain. Three solid geometries of two opening bridges with a simple rectangular pier, designed using AutoCAD, included semicircular, rectangular and pointed arch cross sections. Thereafter, they were converted into the STL format. After checking the errors of these solid geometries by pyADMESH tool, they were imported in Flow-3D. Unit system was set to SI and single water phase at 20°C was set to fluid. Boundary conditions of the numerical models were discharge as inflow, water depth as outflow, wall as bed and channel sides and symmetry as free surface. Sensitivity analysis was conducted on two uniform cell sizes (1 and 2 cm) in longitudinal axis. Therewith non-uniform cell sizes were selected to discretize numerical domain into three mesh blocks. The characteristics of numerical domain were 400 cells at upstream, 100 cells at opening, 450 cells at downstream in X axis and 30 cells at flood plain1, 40 cells at waterway, 30 cells at flood plain2 in Y axis, and 26 cells at free surface, 30 and 40 cells at submerged levels of low flows and high flows in Z axis, respectively. Also sensitivity analysis was conducted on bed roughness which is an important parameter of free flows. Five low flows (sub-soffit) discharges (21, 24, 27, 30, and 35 lit/sec) and four high flows (super-soffit) discharges (40, 45, 50, and 60 lit/sec) were studied. The performance of Flow-3D numerical models was tested using experimental data obtained from the test series which were conducted at the Hydraulic Laboratory, Birmingham University, on two opening semicircular bridge model in compound channel. In those experiments with low flows, the flow didn't touch the bridge opening soffit, so the discharges were extrapolated by means of a MATLAB code. Free surface was modeled by VOF and turbulence was modeled by two equations K-ε methods. The results indicate that Circular opening geometry produces less afflux and upstream flooding and less possibility of downstream bed destruction, so it has advantages on pointed arch geometry. Out of the structural reasons, all of these results may be considered as the hydraulic reason of evolution of the pointed arch to the semicircular geometry from the Safavid to the Qajar era.

**Keywords:** Backwater, Hydraulic jump, Flow-3D, Historical bridges, Opening geometry