

بررسی عددی تأثیر ایجاد حفره در پایه‌ی پل بر خصوصیات جریان پیرامون پایه

احسان جباری*

استادیار، دانشکده فنی
مهندسی، دانشگاه قم.
پست الکترونیک:
e.jabbari@qom.ac.ir

حجت کرمی

استادیار، دانشکده مهندسی
عمران، دانشگاه سمنان.
پست الکترونیک:
hkarami@semnan.ac.ir

مینا مولایی‌فرد

دانشجوی کارشناسی ارشد،
دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه
قم.
پست الکترونیک:
mmolaiy@semnan.ac.ir

در این تحقیق، برای درک بهتر سازوکار عملکرد حفره و تأثیر آن بر هیدرودینامیک جریان پیرامون پایه، مدل‌سازی عددی جریان اطراف پایه‌ی پل با مقطع دایره‌ای دارای حفره و بدون حفره، در شرایط بستر صلب صورت گرفته است. با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی در دسترس و به کمک مدل سه‌بعدی Flow3D، در ارتفاع‌های مشخص در امتداد مسیر جریان و عمود بر آن در پایه، حفره با مقطع دایره ایجاد شده و خصوصیات جریان اطراف پایه‌ی پل با حفره و بدون حفره مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که ایجاد حفره در پایه باعث گسترده‌تر شدن گردابه‌های ایجاد شده بعد از پایه شده و انتظار می‌رود عمق آبستنگی در اطراف پایه کاهش یابد. طبق نتایج حاصل از این تحقیق، می‌توان با ایجاد حفره میزان انرژی آشفته‌گی را ۲۰٪ و تنش برشی بستر را ۵۶٪ کاهش داد. همچنین با توجه به نتایج تنش برشی بستر و مقایسه آن با تنش برشی بحرانی، پیش‌بینی می‌شود میزان آبستنگی اطراف پایه‌ی پل در زمانی که حفره در پایه ایجاد شده است، نسبت به زمانی که پایه بدون حفره است؛ کاهش یابد. از طرفی، با ایجاد حفره، جدایی جریان و تشکیل گرداب برگشتی کمتر دیده می‌شود و جریان چرخشی تشکیل شده در پایین‌دست پایه، کشیده‌تر شده و از حالت گردابی خارج می‌گردد.

واژگان کلیدی: آبستنگی، الگوی جریان، پایه‌ی پل، حفره، مدل‌سازی عددی Flow3D.

۱- مقدمه

اطراف پایه تشدید می‌شود. سامانه‌های گردابی پیچیده‌ای در اطراف پایه به وجود می‌آید. عملکرد این گردابه‌ها باعث حفر گودالی در اطراف پایه‌ها شده که حفره آبستنگی نامیده می‌شود. دو عامل مهم در ایجاد چنین سامانه‌هایی برخورد جریان به پایه و جدا شدن جریان از پایه‌ی پل می‌باشد. الگوی جریانی که در اطراف پایه‌ی پل، شکل می‌گیرد به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با یکی از این دو عامل در ارتباط می‌باشد. برخورد جریان به پایه، گرداب نعل اسبی را شکل داده و جدایی جریان از پایه باعث به وجود آمدن گرداب‌های موسوم به گرداب برخاستگی می‌شود. الگوی جریان در اطراف یک پایه در شکل ۱ نشان داده شده است. گرداب نعل اسبی عامل اصلی فرسایش بستر رودخانه در اطراف پایه‌ی پل به‌ویژه در جلوی آن می‌باشد [۱].

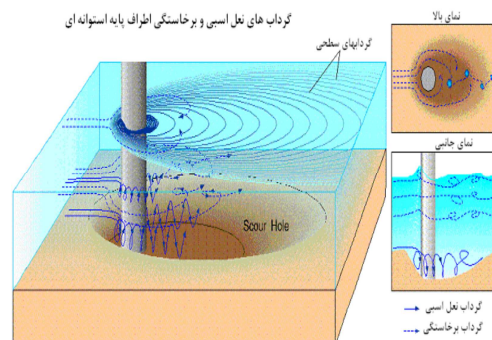
آبستنگی، پتانسیل تهدید سازه پل‌ها و سازه‌های هیدرولیکی را دارد و نهایتاً با نامعین کردن پی سازه‌ها سبب شکست آنها می‌شود. بنابراین شناخت فرآیند آبستنگی اطراف پایه‌های پل و نیز ارائه راهکارهایی جهت محافظت هرچه بیشتر از پایه‌ی پل‌ها و سازه‌های دریایی مشابه در برابر آبستنگی از اهمیت بالایی برخوردار است. الگوی جریان در اطراف پایه‌های پل، بسیار پیچیده بوده که این پیچیدگی با تشکیل حفره آبستنگی در

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۰۷، بازنگری: ۱۳۹۶/۰۳/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۹.
DOI: 10.22091/cer.2017.1930.1073 شناسه دیجیتال

[۳]، بابار^۲ و همکاران (۲۰۰۰) [۴]، بایرام و لارسن^۳ (۲۰۰۰) [۵]، حیدرپور (۲۰۰۲) [۶]، الرازک^۴ و همکاران (۲۰۰۳) [۷]، گرمالدی^۵ و همکاران (۲۰۰۹) [۸]، پیرمحمدی و حیدرپور (۱۳۸۵) [۹] و حیدرپور و همکاران (۱۳۸۶) [۱۰]، اشاره کرد. در تحقیقات چویو^۶ (۱۹۹۲) در مورد تأثیر شکاف پایه بر کاهش عمق آبستنگی موضعی اطراف یک پایه‌ی پل دایروی، نتایج نشان داد که با افزایش عرض و طول شکاف ایجاد شده در پایه، از میزان عمق آبستنگی کاسته خواهد شد [۱۱]. همچنین در تحقیقات کومار^۷ و همکاران (۱۹۹۹)، در مورد پایه‌های پل با دو برابر اندازه بازشدگی شکاف، طول‌های مختلف شکاف و زوایای مختلف قرارگیری نسبت به مسیر جریان، نتایج نشان داد که با امتداد یافتن شکاف پایه تا بستر کانال بر میزان تأثیرات آن در کاهش عمق آبستنگی افزوده می‌گردد [۱۲].

روش دیگر کاهش عمق آبستنگی، استفاده از صفحات مستغرق است که در اوایل دهه ۸۰ میلادی توسط ادگارد و کندی^۸ در انیستیتیوی هیدرولیک دانشگاه آیووا^۹ به‌منظور حفاظت سواحل خارجی پیچ رودخانه استفاده شد [۱۳]. نتایج آزمایشات بارکدل^{۱۰} و همکاران (۱۹۹۹) در خصوص استفاده از صفحات مستغرق در جلوگیری از ورود رسوبات در مدل یک آبگیر نشان داد که نصب صفحات در قسمت جلوی آبگیر، میزان رسوبات وارده به آبگیر را ۷۰ تا ۸۰٪ کاهش می‌دهد [۱۴]. همچنین لاچلان^{۱۱} در دو حالت جریان آب زلال و بستر زنده به بررسی اثر ایجاد صفحات مستغرق در میزان کاهش آبستنگی پایه‌ی پل با مقطع استوانه‌ای پرداخت.



شکل ۱- الگوی جریان در اطراف یک پایه [۱].

راهکارهای کاهش آبستنگی در پایه‌ی پل‌ها را می‌توان به دو دسته کلی، روش‌های پوششی همراه با مقاوم‌سازی بستر رودخانه و استفاده از وسایل دگرگون‌کننده جریان، دسته‌بندی نمود. روش‌های پوششی برای مقابله با تنش برشی که در طی جریان‌های شدید ایجاد می‌شوند به‌کار می‌رود. اما وسایل دگرگون‌کننده جریان، به‌منظور گسسته کردن میدان جریان اطراف پایه‌ها و در نتیجه کاهش قدرت فرسایش دهنده جریان رو به پایین و گردابه‌های نعل اسبی اطراف پایه‌های پل، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

استفاده از شکاف در عرض پایه‌ی پل در سال‌های اخیر، به‌عنوان روشی جدید در زمینه‌ی کاهش آبستنگی موضعی مطرح شده است که هدف اصلی آن، کاهش انحراف جریان به‌سمت بستر و در نتیجه کاهش قدرت برخورد جریان رو به پایین با بستر رودخانه است. از پارامترهای مؤثر بر جریان در اطراف شکاف، عرض، طول و محل قرارگیری شکاف و طولی از آن که درون بستر رودخانه قرار می‌گیرد، می‌باشند [۲]. با استفاده از شکاف در پایه‌ی پل‌ها با کاهش قطر مؤثر پایه، قدرت گردابه کاهش یافته و عبور جریان از داخل شکاف موجب کاهش شدت گرادیان فشاری رو به پایین در جلوی پایه می‌شود. از جمله تحقیقاتی که برای بررسی اثر شکاف بر آبستنگی انجام شده است، می‌توان به تحقیقات رودکیوی^۱ (۱۹۸۱)

²- Babar

³- Bayram and Larson

⁴- El-Razek

⁵- Grimaldi

⁶- Chiew

⁷- Kumar

⁸- Odgaard and Kennedy

⁹- University of Iowa

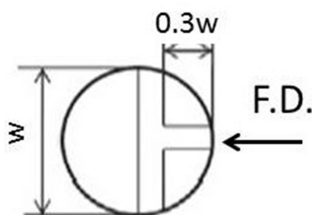
¹⁰- Barckdoll

¹¹- Lauchlan

¹- Raudkivi

آبشستگی، کاهش می‌یابد؛ تا آنجا که بیشترین مقدار کاهش آبشستگی به ۵۹٪ می‌رسد. از طرفی براساس تحقیقات زمردیان و همکاران (۱۳۹۰) تأثیر توأم طوقه و کابل بیشتر از تأثیر جداگانه هریک می‌باشد؛ به طوری که در کمترین مقدار، ۹٪ عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد [۲۱].

یکی از روش‌های دگرگون کننده جریان استفاده از حفره است. تنها مطالعات موجود این روش، مربوط به سال ۲۰۱۳ است که در آن، غراب^{۱۶} مدل‌سازی آزمایشگاهی روش کاهش آبشستگی اطراف پایه‌ی پل با استفاده از روش اصلاح شده کاهش گرداب را مورد مطالعه قرار داد. وی، مطابق شکل ۲، با ایجاد یک حفره در برابر جریان با دبی ثابت، تشکیل گرداب در جریان مقابل پایه را کاهش داده و در جهت کاهش اثر جریان رو به پایین و تشکیل گرداب، یک حفره به قطر ۲۰٪ پهنای پایه در مقابل جریان ایجاد کرده و از طریق دو دهانه متصل به طرف دیگر پایه، جریان را منتقل نمود. این جریان به انتشار ایستایی جریان در مقابل پایه و همچنین کاهش سرعت جریان رو به پایین کمک می‌کند. براساس نتایج غراب، در مقطع دایره‌ای با قطر حفره ۲۰٪ عرض مقطع و فاصله عمودی ۰/۵ برابر عرض پایه، عمق حفره آبشستگی ۴۵٪ کاهش خواهد یافت [۲۲].



شکل ۲- مقطع پایه‌ی پل در محل حفره [۲۲].

از آنجا که مدل‌های محاسباتی معتبر، امکانات بسیار وسیع‌تری را در زمان کوتاه‌تر و با هزینه بسیار کمتر جهت چنین مطالعاتی فراهم می‌کنند؛ لذا در پژوهش حاضر، جهت بررسی چگونگی عملکرد حفره ایجاد شده بر روی

او برای سه زاویه ۱۵، ۲۵ و ۳۵ نتیجه گرفت با افزایش زاویه صفحات مستغرق، عملکرد آنها افزایش می‌یابد [۱۵]. جانسون^{۱۲} و همکاران (۲۰۰۱) با بررسی تأثیر صفحات مستغرق در جلوگیری از آبشستگی پایه‌های کناری پل‌ها به روش آزمایشگاهی مشاهده کردند که این صفحات، سرعت جریان و تنش برشی را در ساحل کاهش داده و در مقابل، سرعت جریان را در مرکز کانال افزایش می‌دهند [۱۶]. صمیمی بهبهان و همکاران (۲۰۰۶) نیز با بررسی تأثیر شکل صفحات بر آبشستگی پل‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از صفحات مستغرق با آرایش مختلف در حالت چسبیده به پایه، بهترین عملکرد را دارد [۱۷]. قربانی و کلز^{۱۳} (۲۰۰۸) با مطالعه آزمایشگاهی تأثیر صفحات مستغرق منفرد و دوپل بر میزان کاهش آبشستگی پایه‌ها دریافتند که استفاده از دو صفحه‌ی مستغرق نسبت به یک صفحه در کاهش عمق آبشستگی مؤثرتر است [۱۸].

از دیگر روش‌های کاهش آبشستگی موضعی پایه‌ی پل، استفاده از کابل است که این وسیله توسط دی^{۱۴} و همکاران (۲۰۰۶) به‌عنوان یک اقدام پیشگیرانه اقتصادی و آسان پیشنهاد شد [۱۹]. مطالعاتی نیز توسط خاویراکپام و مزومدار^{۱۵} (۲۰۰۹) صورت گرفت. محققان به این نتیجه رسیدند که نقش کابل، منحرف کردن جریان‌های رو به پایین و تضعیف قدرت گردابه‌های نعل اسبی می‌باشد. در این روش، کابل‌ها به‌صورت مارپیچی روی پایه قرار گرفته و با انحراف گرداب نعل اسبی منجر به کاهش عمق آبشستگی می‌شوند. با افزایش قطر، تعداد و کاهش زاویه کابل‌ها، عمق آبشستگی کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش عمق آبشستگی ۴۶٪ گزارش شد [۲۰]. نتایج تحقیقات عقلی و زمردیان (۱۳۹۱) نشان داد، با افزایش قطر کابل و کمتر شدن فاصله میان گام‌ها، مقدار بیشتری از

¹²- Johnson

¹³- Ghorbani and kells

¹⁴- Dey

¹⁵- Khwairakpam and Mazumdar

¹⁶- Ghorab

(x, y, z) ، که به روش حجم محدود حل می‌شوند؛ در حالت سیال تراکم‌ناپذیر، به صورت رابطه (۱) است:

$$\begin{aligned} V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v A_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w A_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w A_z)}{\partial z} &= R_{SOR} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن V_F ، کسری از حجم مرتبط با جریان، ρ چگالی سیال، (u, v, w) مؤلفه‌های سرعت، (A_x, A_y, A_z) کسری از مساحت مرتبط با جریان، (G_x, G_y, G_z) شتاب جرمی، R_{SOR} ترم چشمه، (F_x, F_y, F_z) شتاب لزجت در جهت‌های (x, y, z) ، و P فشار می‌باشند.

روش حل: در نرم‌افزار Flow3D، معادلات ناویراستوکس با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک شبکه‌ی جابه‌جا شده برای شبیه‌سازی میدان جریان حل می‌شوند. از روش TruVOF در شبیه‌سازی سطح آزاد استفاده شده است. در این روش براساس رابطه (۲) با حل معادلات جابه‌جایی، F به‌عنوان جزء حجم سیال در یک سلول سطح آزاد محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (FuA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FwA_z) \right\} = 0 \quad (2)$$

در صورتی‌که F برابر صفر باشد، سلول پر از هوا و هنگامی‌که $F = 1$ باشد، به این معنی است که سلول، پر از آب است. سطح آزاد جایی تعیین می‌شود که در آن $F = 0.5$ است [۲۲].

۲-۲- مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

با توجه به اینکه در مدل آزمایشگاهی غراب، نتایج در زمینه خصوصیات جریان، اندازه‌گیری نشده و فقط نتایج آبشستگی بیان شده است، برای صحت‌سنجی مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی رولاند^{۱۹} در سال ۲۰۰۵ استفاده شده است. در این تحقیق، یک فلوم آزمایشگاهی

خصوصیات و هیدرودینامیک جریان پیرامون پایه، از مدل‌سازی عددی استفاده شده است. براساس مطالعات انجام شده به‌نظر می‌رسد چنین تحلیلی تاکنون انجام نشده است.

۲- مواد و روش‌ها

در انجام تحقیق حاضر از مدل سه‌بعدی Flow3D و مدل آزمایشگاهی استفاده شده است که در ادامه به آنها پرداخته خواهد شد.

۲-۱- مدل عددی Flow3D

مدل Flow3D، یکی از مدل‌های بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات است که توسعه آن توسط Flow Science, Inc صورت گرفته است. اخیراً این مدل توانسته در تحقیقات و صنعت کاربرد زیادی پیدا کند. اولین خصوصیت Flow3D این است که از یک سیستم شبکه‌بندی مستطیلی با قابلیت تغییر بالا برای شبکه‌بندی استفاده می‌کند. این قابلیت، موجب می‌شود که شبکه و یا هندسه به‌صورت مجزا از یکدیگر قابل تفکیک باشند. به‌عبارت ساده‌تر از یک سیستم شبکه‌بندی ثابت متصل به هندسه و یا اجزای محدود استفاده نمی‌کند. مدل‌های آشفستگی که در نرم‌افزار Flow3D مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل طول اختلاط پراتل، تک معادله‌ای، $k-\epsilon$ ، RNG^{17} و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES^{18}) می‌باشد.

همانگونه که مشاهده می‌شود تعداد مدل‌های آشفستگی ارائه شده به‌علت کاربرد وسیع نرم‌افزار Flow3D در زمینه‌های متفاوت، قابل توجه می‌باشد [۲۳].

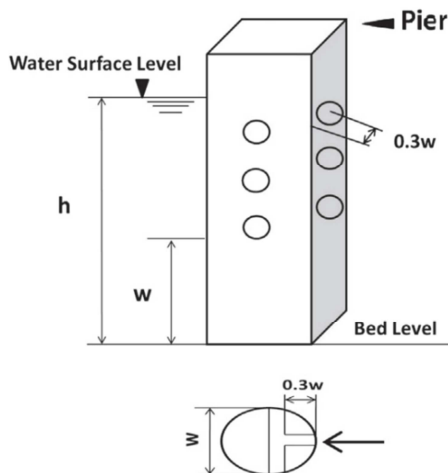
در این نرم‌افزار، تحلیل سه‌بعدی معادلات ناویراستوکس رینولدزی در دستگاه مختصات کارتزین

¹⁷- ReNormalization-Group

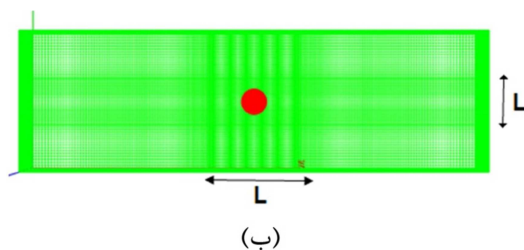
¹⁸- Large Eddy Simulation

¹⁹- Roulund

حفره‌های ایجاد شده در این پایه دارای مقطع دایره‌ای بوده و قطری برابر ۲۰٪ عرض پایه دارند و با فاصله نصف عرض پایه در ارتفاع قرار گرفته‌اند.

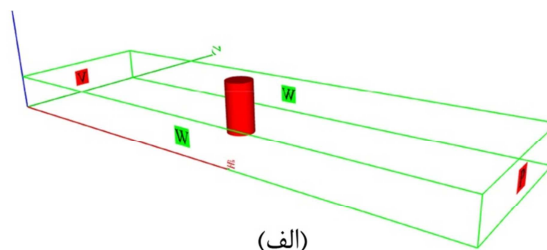


شکل ۳- خصوصیات حفره ایجاد شده [۲۰].



(ب)

برای بررسی تأثیر حفره بر خصوصیات جریان از نتایج آزمایشگاهی غراب در سال ۲۰۱۳ استفاده شده است [۲۰]. مطابق شکل ۴ (الف)، فلوم آزمایشگاهی این تحقیق دارای طول ۱۶/۵ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۶۵ متر بوده و پایه‌ی پل با توجه به شکل ۳ با مقطع دایره‌ای با قطر ۰/۱ متر مدل‌سازی شده است. همچنین در مدل آزمایشگاهی فوق، جریان با دبی ۰/۰۴ مترمکعب بر ثانیه وارد کانال شده که ارتفاع جریان ۰/۳ متر در نظر گرفته شده است. از طرفی بستر کانال، دارای ۰/۳ متر رسوب با قطر متوسط (D_{50}) برابر ۰/۰۲۳ متر می‌باشد.



(الف)

شکل ۴- (الف) مدل هندسی فلوم و (ب) مش‌بندی ریز کانال.

اختلاط پراتنل، تک معادله‌ای، $k-\epsilon$ ، RNG و LES و با شرایط مش‌بندی جدول ۱ انجام گرفت.

مطابق شکل ۴ (ب)، مش‌بندی ریز و غیریکنواخت در نظر گرفته شده است، به‌صورتی‌که در اطراف پایه (فواصل L) در طول و عرض کانال مش‌بندی ریزتر و با فاصله گرفتن از پایه مش‌بندی درشت‌تر استفاده شده است.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- صحت‌سنجی

جهت صحت‌سنجی مدل عددی Flow3D از نتایج آزمایشگاهی رولاند در سال ۲۰۰۵ استفاده گردید. آزمایشات در بستر صلب انجام شده بود [۲۳]. مدل‌سازی عددی مختلف با مدل‌های آشفتگی گوناگون شامل طول

جدول ۱- شرایط مدل‌سازی.

مش‌بندی غیریکنواخت			
نوع مش‌بندی	تعداد سلول در جهت x	تعداد سلول در جهت y	تعداد سلول در جهت z
ریز	۲۶۰	۶۱	۳۰
درشت	۲۰۱	۳۱	۲۰

میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی نیز با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است [۱۱]:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i - \hat{Q}_i| \quad (5)$$

نتایج حاصل از این ارزیابی در جدول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج خطای شبیه‌سازی جریان برای مدل‌های مختلف آشفتگی در تراز ۱۰ سانتیمتری.

معیار ارزیابی			مدل آشفتگی
MAE	RMSE	NSE	
۰/۰۳۷۳۹	۰/۰۵۱۱۷	۰/۸۲۱۴	ONE-EQUATION
۰/۰۲۸۷۵	۰/۰۳۸۰۸	۰/۹۰۱۰	K-E
۰/۰۳۲۲۸	۰/۰۴۴۶۲	۰/۸۶۴۲	K-W
۰/۰۲۸۱۷	۰/۰۳۸۹۹	۰/۸۹۶۳	LARGE EDDY
۰/۰۱۷۹۲	۰/۰۲۵۶۴	۰/۹۵۵۱۶	RNG

جدول ۳- نتایج خطای شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان برای مش‌بندی‌های مختلف در تراز ۱۰ سانتیمتری.

معیار ارزیابی			مش‌بندی
MAE	RMSE	NSE	
۰/۰۴۹	۰/۰۶۳۳	۰/۷۲۶	درشت
۰/۰۱۷۹	۰/۰۲۶	۰/۹۵۵	ریز

بررسی نتایج نشان داد که مدل‌سازی عددی با مش‌بندی غیریکنواخت ریز و مدل آشفتگی RNG، بهترین نتایج را در مقایسه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ارائه می‌دهد. در شکل ۶ مقایسه سرعت جریان آزمایشگاهی و عددی در تراز ۱۰ سانتیمتری از بستر را نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، اختلاف زیادی مابین نتایج عددی و تجربی وجود ندارد.

۳-۲- مدل‌سازی

با توجه به نتایج بخش قبل، مدل آزمایشگاهی غراب با مش‌بندی غیریکنواخت و مدل آشفتگی RNG در نرم‌افزار Flow3D به جهت بررسی خصوصیات جریان با

شرایط مرزی کانال فوق، مطابق شکل ۴ (الف) به این صورت است که شرط مرزی تقارن در مرز بالایی، شرط سرعت معلوم در مرز ورودی و شرط مرزی فشار مشخص در مرز خروجی، مورد استفاده قرار گرفتند. در جداره‌های کانال از شرط مرزی دیوار استفاده شده است و پایه با شرایط هندسی بیان شده در فاصله ۵ متری از ورودی کانال مدل شد.

برای ارزیابی عملکرد مدل عددی از معیارهای زیر استفاده شده است [۲۴]:

(الف) جذر میانگین مربع خطاها ($RMSE^{۲۰}$)

(ب) معیار کارایی نش- ساتکلیف ($NSE^{۲۱}$)

(ج) میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل ($MAE^{۲۲}$).

جذر میانگین مربع خطاها، یکی از مشخصه‌های پراکندگی می‌باشد. ارجحیت این شاخص نسبت به دیگر شاخص‌های آماری، یکسان بودن واحد آن با واحد متغیر است. به این معنا که اگر متغیر x و y بیانگر سرعت جریان برحسب متر بر ثانیه باشند، واحد جذر میانگین مربع خطاها نیز متر بر ثانیه است. مقایسه پراکندگی دو متغیر که واحدهای مختلفی دارند با این مشخصه امکان‌پذیر نمی‌باشد. رابطه جذر میانگین مربع خطاها عبارت است از:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}} \quad (3)$$

معیار کارایی نش- ساتکلیف را نخستین بار، در سال ۱۹۷۰، نش و ساتکلیف به‌کار گرفتند که رابطه آن برابر است با:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_m^i - Q_o^i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o^i - \bar{Q}_o)^2} \quad (4)$$

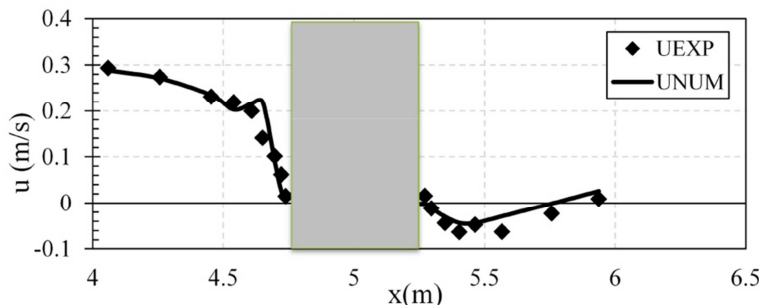
²⁰ - Root Mean Square Error

²¹ - Nash- Sutcliffe Efficiency

²² - Mean Absolute Error

کانال صلب با زبری 0.00023 در نظر گرفته شده است. همچنین، پایه‌ی پیل به قطر 0.05 متر و ارتفاع 0.65 متر مورد استفاده قرار گرفته است.

شرایط زیر مدل‌سازی شده است. کانال با عرض 0.5 متر، طول 8 متر و ارتفاع 0.65 متر فرض شده است. جریان عبوری با سرعت 0.267 متر بر ثانیه، عمق 0.3 متر و کف



شکل ۶- مقایسه سرعت حاصل از مدل عددی RNG با نتایج آزمایشگاهی در تراز 10 سانتیمتری از بستر.

- الف) سرعت برآیند جریان
- ب) خطوط جریان
- ج) انرژی آشفتگی
- د) تنش برشی بستر

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با فاصله گرفتن از پایه، تغییرات سرعت در طول کانال، کاهش می‌یابد؛ به طوری که در توزیع سرعت، در فاصله $4/5$ متری از ابتدای کانال و فاصله 5 متری اختلاف ناچیزی وجود دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت با فاصله گرفتن از پایه و در حدود فاصله‌ای $4/5$ متر از ابتدای کانال، الگوی جریان تحت تأثیر پایه قرار ندارد. بنابراین از فاصله $4/5$ متر از ابتدای کانال به بررسی نتایج پرداخته شده است. این فاصله می‌تواند به صورت یک نسبت از قطر پایه در نظر گرفته شود. این نسبت، برابر فاصله $10D$ (D برابر قطر پایه) از مرکز پایه خواهد بود.

۳-۳-۱- سرعت برآیند جریان

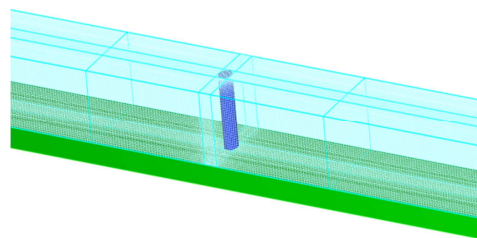
در شکل ۹، سرعت برآیند جریان در تراز 0.15 متر از بستر (تراز دارای حفره) و در تراز 0.17 متر از بستر (تراز بدون حفره) در دو مدل‌سازی پایه‌ی بدون حفره و با حفره نشان داده شده است.

همانطور که در این شکل مشخص است ایجاد حفره در پایه سبب می‌شود مقدار بیشینه سرعت در اطراف پایه تغییر چندانی نداشته باشد و برابر 0.39 متر بر ثانیه در

مدل‌سازی عددی در دو حالت با حفره و بدون حفره صورت گرفته و در حالت استفاده از حفره، عرض حفره 0.2 برابر عرض پایه و فواصل حفره‌ها برابر با نصف عرض پایه در نظر گرفته شده است. مشبندی مطابق با جدول ۴ و شکل ۷ انجام شده است. لازم به ذکر است، شرایط مدل‌سازی شده در حالت بستر صلب، مبین شرایط ابتدایی آبشستگی می‌باشد.

جدول ۴- مشبندی کانال با پایه دارای حفره.

تعداد سلول در جهت Z	تعداد سلول در جهت Y	تعداد سلول در جهت X
۴۱	۴۵	۳۹۶

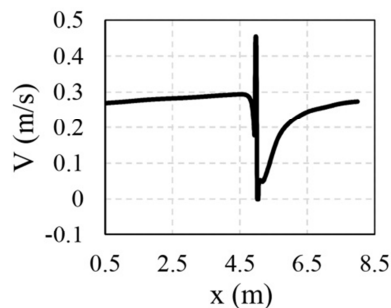


شکل ۷- مشبندی کانال با پایه دارای حفره.

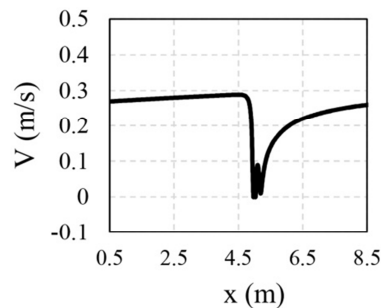
۳-۳-۲- تحلیل نتایج

نتایج حاصل از خصوصیات جریان اطراف پایه بدون حفره و با حفره، در ادامه بیان شده است. پارامترهای هیدرولیکی مورد بررسی، شامل موارد ذیل می‌باشد:

جریان، بیشینه سرعت را نسبت به جریان اطراف پایه بدون حفره خواهد داشت.

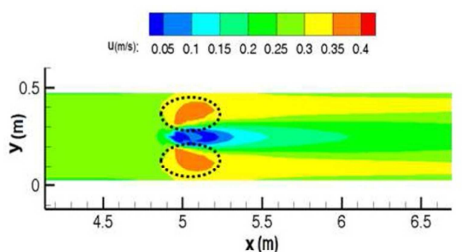


(ب)

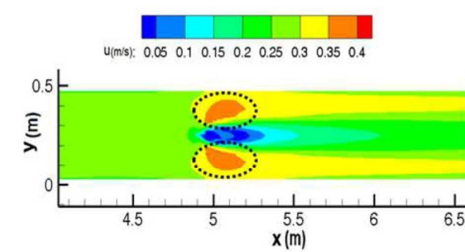


(الف)

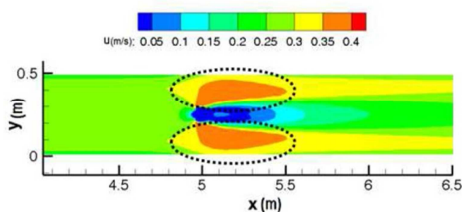
شکل ۸- سرعت برآیند V (متر بر ثانیه)، در تراز 0.15 از بستر و در $y=0.25$. (الف) پایه بدون حفره و (ب) پایه با حفره.



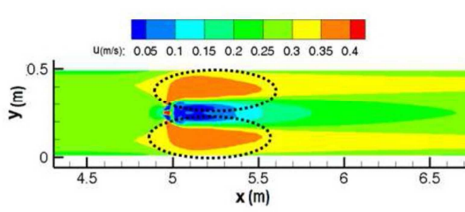
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

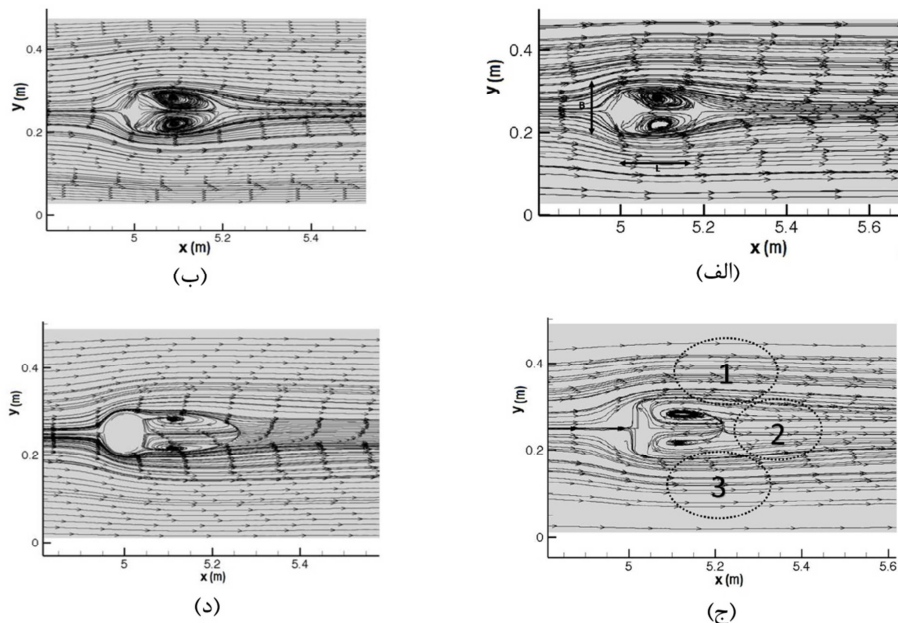
شکل ۹- سرعت برآیند V (متر بر ثانیه)، (الف) پایه بدون حفره در تراز 0.15 از بستر، (ب) پایه بدون حفره در تراز 0.17 از بستر، (ج) پایه با حفره در تراز 0.15 از بستر و (د) پایه با حفره در تراز 0.17 از بستر.

با توجه به ناحیه‌بندی در بخش (ج) شکل ۱۰ و تحلیل‌های قسمت فوق مشخص است، زمانی که پایه دارای حفره نیست، ناحیه ۲ فضای بیشتری از کانال را اشغال می‌کند؛ در صورتی که هنگام ایجاد حفره در پایه، این ناحیه محدوده کمتری داشته و محدوده ۱ و ۳ که محل عبور جریان بدون گرداب است، بیشتر خواهد بود. به عبارت دیگر، در حالت بدون حفره به وضوح، جدایی جریان و تشکیل گرداب برگشتی مشاهده می‌شود. این در حالی است که در زمان ایجاد حفره، این حالت دیده نمی‌شود.

۳-۲- خطوط جریان

در شکل ۱۰ خطوط جریان در اطراف پایه‌ی پل در ترازهای 0.15 متر از بستر (تراز دارای حفره) و در تراز 0.17 متری از بستر (تراز بدون حفره) در پایه بدون حفره و با حفره نشان داده شده است.

به صورت کلی ویژگی‌های خطوط جریان را می‌توان در جدول ۵ خلاصه کرد. مشخص است ایجاد حفره در پایه‌ی پل، ابعاد گردابه به خصوص طول آن را افزایش خواهد داد. بیشترین افزایش در مقاطع مورد بررسی، ۱۸ درصد افزایش داشته است.



شکل ۱۰- خطوط جریان. (الف) پایه بدون حفره در تراز ۰/۱۵ از بستر، (ب) پایه بدون حفره در تراز ۰/۱۷ از بستر، (ج) پایه با حفره در تراز ۰/۱۵ از بستر و (د) پایه با حفره در تراز ۰/۱۷ از بستر.

جدول ۵- ابعاد (برحسب متر) گردابه‌های ایجاد شده بعد از پایه‌ی پل.

تراز ۰/۱۷	تراز ۰/۱۵	بعد مورد بررسی (متر)	نوع پایه
۰/۱۸	۰/۱۸	L	بدون حفره
۰/۱۰	۰/۱۰	B	
۰/۲۲	۰/۱۹	L	با حفره
۰/۱۲	۰/۱۰	B	

در شکل ۱۲ تنش برشی بستر در دو حالت بدون حفره و با حفره مقایسه شده است. با بررسی نتایج، حداکثر تنش برشی بستر در کانال با پایه بدون حفره برابر $۰/۷۶۵$ نیوتن بر مترمربع بوده اما در کانال با پایه‌ی حفره‌دار برابر $۰/۳۳۲$ نیوتن بر مترمربع است. بنابراین با ایجاد حفره در پایه، ۵۶% میزان تنش برشی بستر کاهش خواهد یافت.

اگر فرض کنیم بستر فرسایش‌پذیر باشد، با توجه به روش تنش برشی بحرانی τ_{cr} جهت بررسی آستانه حرکت ذرات، مقدار تنش برشی بحرانی براساس روابط و نمودار شیلدز [۱]، برابر $۰/۲۱۶$ خواهد بود. بنابراین طبق شکل ۱۲ و نسبت τ/τ_{cr} مشخص است مساحتی از بستر که

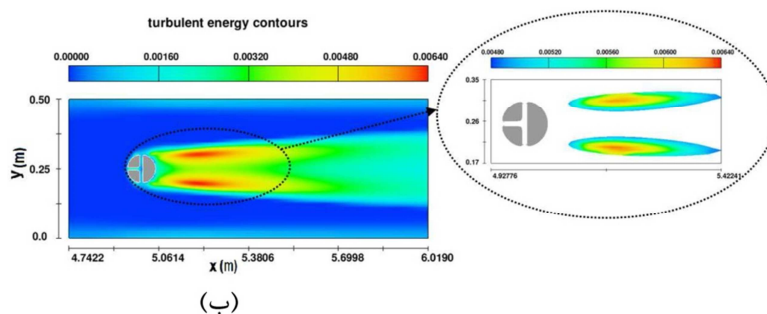
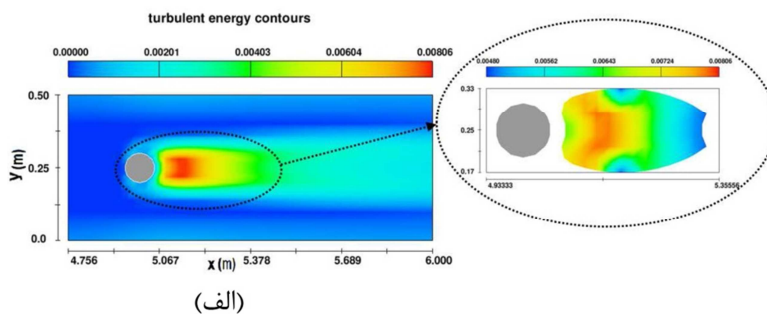
۳-۳-۳- انرژی آشفتگی

همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده می‌شود، بیشترین مقدار انرژی آشفتگی در تراز ۰/۱۵ متر از بستر در کانالی که دارای پایه بدون حفره است، برابر $۰/۰۰۸۰۶$ نیوتن-متر می‌باشد؛ در صورتی که در کانال با پایه دارای حفره، این مقدار برابر $۰/۰۰۶۴$ نیوتن-متر است. همچنین حداکثر انرژی آشفتگی در کانال با پایه دارای حفره در مساحت بیشتری نسبت به کانال با پایه بدون حفره ایجاد می‌شود. مشاهده می‌شود استفاده از حفره در پایه، انرژی آشفتگی را بیش از ۲۰ درصد کاهش خواهد داد.

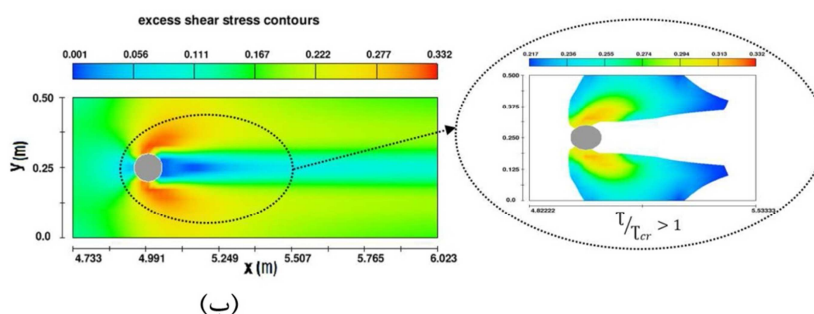
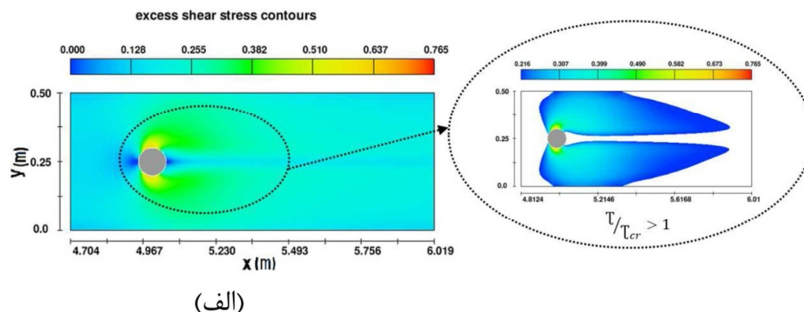
۳-۳-۴- تنش برشی بستر

آبشستگی در پایه با حفره نسبت به پایه بدون حفره کاهش خواهد داشت.

مقدار تنش برشی بیشتر از تنش برشی بحرانی دارد، در اطراف پایه بدون حفره بیشتر از اطراف پایه دارای حفره است. بنابراین می‌توان پیش‌بینی نمود که میزان



شکل ۱۱- انرژی آشفتگی K (نیوتن-متر) در تراز ۰/۱۵ متر از بستر کانال. (الف) پایه بدون حفره و (ب) پایه با حفره.



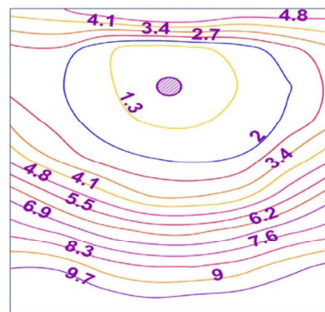
شکل ۱۲- تنش برشی τ (نیوتن بر مترمربع) در پایین‌ترین تراز کانال. (الف) پایه بدون حفره و (ب) پایه با حفره.

۳-۴- مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی

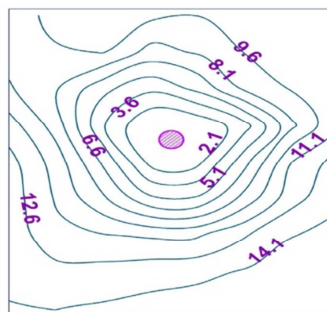
با توجه به توپوگرافی اطراف پایه‌ی پل، حاصل از نتایج آزمایشگاهی در شکل ۱۳، خطوط تراز نشان می‌دهند زمانی که در پایه حفره وجود دارد آبشستگی در

بنابراین باتوجه کاهش ۲۰ تا ۴۵ درصدی عمق آبستنگی با ایجاد حفره در پایه‌ی پل در آزمایش‌های انجام شده توسط غراب، پیش‌بینی می‌شود در مدل‌سازی عددی این تحقیق، آبستنگی اطراف پایه‌ی پل با حفره، نسبت به هنگامی که پایه بدون حفره است کاهش می‌یابد.

دو طرف پایه بیشتر رخ می‌دهد و در جلوی پایه میزان آبستنگی کمتر است. در صورتی که در پایه بدون حفره در جلوی پایه آبستنگی بیشتری رخ می‌دهد که این نتیجه در تنش برشی بستر در بخش ۳-۳-۴ تحلیل نتایج مدل‌سازی عددی نیز کاملاً پیش‌بینی می‌شد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۳- توپوگرافی بستر در اطراف پایه‌ی پل. (الف) پایه بدون حفره و (ب) پایه با حفره [۲۰].

۴- نتیجه‌گیری کلی

همچنین تنش برشی بیشینه بستر، در حالتی که در پایه حفره ایجاد شده است نسبت به زمانی که حفره‌ای در پایه وجود ندارد، کاهش ۵۶ درصدی داشت. اگر بستر فرسایش‌پذیر باشد، با توجه به تنش برشی بحرانی، پیش‌بینی می‌شود میزان آبستنگی در پایه‌ی پل با حفره نسبت به پایه بدون حفره کاهش خواهد داشت.

باتوجه به اینکه موضوع مورد پژوهش در گذشته، صرفاً به صورت مدل‌سازی آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته بود، در این تحقیق، برای اولین بار و به منظور استفاده از مزایای مدل‌سازی عددی، شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان اطراف پایه‌ی پل به کمک نرم‌افزار Flow3D صورت گرفت و اثر حفره بر الگوی جریان در حالت تک پایه ارزیابی گردید. تحلیل‌ها نشان داد که تطابق نسبتاً مناسبی بین نتایج به دست آمده از مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی در خصوص پارامتر سرعت وجود دارد. با ایجاد حفره در پایه، جریان چرخشی تشکیل شده در پایین دست پایه، کشیده‌تر شده و نسبت به پایه بدون حفره تقریباً از حالت گردابی خارج می‌شوند. در حالت بدون حفره به وضوح جدایی جریان و تشکیل گرداب برگشتی مشاهده می‌شود؛ در صورتی که در حالت ایجاد حفره این حالت دیده نمی‌شود. تأثیر حفره‌ها بر خطوط جریان در ترازى که حفره وجود ندارد، بیشتر از ترازى است که حفره وجود دارد. ایجاد حفره باعث کاهش ۲۰ درصدی بیشترین انرژی آشفتگی خواهد شد.

با عنایت به اینکه تاکنون روی موضوع این تحقیق به صورت محدود کار شده است، می‌توان موضوع را با شرایطی شامل موارد زیر بررسی نمود و به بهینه‌ترین حالت در کاهش آبستنگی دست یافت.

مواردی که می‌تواند زمینه تحقیقات آتی در زمینه مورد بحث باشد:

- ۱- تغییر زاویه قرارگیری حفره‌ها در مسیر جریان.
- ۲- تغییر فواصل عمودی حفره‌ها که البته در این زمینه در تحقیقات آزمایشگاهی بررسی صورت گرفته است.
- ۳- تغییر زاویه داخلی برخورد حفره‌ها.
- ۴- تغییر ابعاد حفره‌ها.
- ۵- بررسی موضوع بر روی گروه پایه‌ها.

۶- بررسی امکان ایجاد این روش در آبشکن‌ها و ایجاد و تأثیر آن بر روی آبشستگی.

مراجع

- [۱] معاونت نظارت راهبردی- دفتر نظام فنی اجرایی. (۱۳۹۰). "راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی نشریه شماره ۵۴۹".
- [2] Melville, B., W. & Coleman, S., E. (2000). "Bridge scour", Water Resources Publications, LLC. Colorado. U.S.A. 550p.
- [3] Raudkivi, A. j. (1990). loose boundary hydraulic. 3rd Edition. Pergamon Press.
- [4] Babar, R., Setia, S., & Setia, B. (2000). "Scour protection by a slot through a model bridge pier", Proceeding of International Symposium on Recent Advances in Experimental Fluid Mechanics. Indian Institute of Technology. Kanpur, India.
- [5] Bayram, A., & Larson, M. (2000). "Analysis of scour around a group of vertical piles in the field", *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 126(4), 215-220.
- [6] Heidarpour, M. (2002, September). "Control and reduction of local scour at bridge piers by using slot", In *International Conference on fluvial hydraulics. Louvain-la-Neuve, Belgium: Balkema*.
- [7] El-Razek, M., El-Motaleb, M. A., & Bayoumy, M. (2003). "Scour reduction around bridge piers using internal openings through the pier", *Alexandria Engineering Journal*, 42(2), 241-248.
- [8] Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F., & Cardoso, A. H. (2009). "Countermeasures against local scouring at bridge piers: slot and combined system of slot and bed sill", *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(5), 425-431.
- [۹] پیرمحمدی، ر.، حیدرپور، م. (۱۳۸۵). "بررسی شکل و ابعاد محدوده سنگ‌چین اطراف پایه‌های استوانه‌ای پل‌ها برای کنترل آبشستگی موضعی"، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- [۱۰] حیدرپور، م.، افضل‌مهر، ح.، خدارحمی، ز. (۱۳۸۶). "حفاظت گروه پایه‌های استوانه‌ای پل در برابر آبشستگی موضعی با استفاده از شکاف"، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۳، ش.ص. ۱۷۴ - ۱۸۰.
- [11] Chiew, Y. M. (1992). "Scour protection at bridge piers". *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), 1260-1269.
- [12] Kumar, V., Ranga Raju, K. G., & Vittal, N. (1999). "Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 125(12), 1302-1305.
- [13] Odgaard, A. J., & Kennedy, J. F. (1983). "River-bend bank protection by submerged vanes", *Journal of hydraulic engineering*, 109(8), 1161-1173.
- [14] Barkdoll, B. D., Ettema, R., & Odgaard, A. J. (1999). "Sediment control at lateral diversions: Limits and enhancements to vane use", *Journal of hydraulic engineering*, 125(8), 862-870.
- [15] Lauchlan, C.S. (1999). "Pier scour countermeasures", Ph.D. Thesis. University of Auckland. New Zealand, 299-316.
- [16] Johnson, P. A., Hey, R. D., Tessier, M., & Rosgen, D. L. (2001). "Use of vanes for control of scour at vertical wall abutments", *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(9), 772-778.
- [17] Samimiye Behbahan, T. Barani, GH. Rahim Khanli, M. and Khanjani, M. (2006). "Experimental investigation of submerged vanes effect on scouring of bridge piers", National Congress of Irrigation and Drainage Networks management, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.
- [18] Ghorbani, B., & Kells, J. A. (2008). "Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier", *Journal of Hydraulic Research*, 46(5), 610-619.
- [19] Dey, S., Raikar, R. V., & Roy, A. (2008). "Scour at submerged cylindrical obstacles under steady flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 105-109.
- [20] Khwairakpam, P., & Mazumdar, A. (2009). "Local scour around hydraulic structures", *short paper, international journal of recent trends in engineering*, 1(6), 59-61.
- [۲۱] عقلی، م.، زمردیان، م.ع. (۱۳۹۱). "تأثیر توأم طوق و کابل بر روی عمق آبشستگی اطراف پایه پل در قوس رودخانه‌ها"، مجله علوم و مهندسی آبیاری، دوره ۳۶، شماره ۳، ش.ص. ۳۱ - ۴۰.
- [22] EL-Ghorab, E. A. (2013). "Reduction of scour around bridge piers using a modified method for vortex reduction", *Alexandria Engineering Journal*, 52(3), 467-478.

- [۲۳] قاسم‌زاده، ف. (۱۳۹۴). "شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی در Flow3D"، چاپ سوم، انتشارات نوآور.
- [۲۴] اسدی پرتو، ا.، اقبال‌زاده، ا.، جوان، م. (۱۳۹۳). "بررسی عددی اثر عرض شکاف بر الگوی جریان اطراف پایه پل"، نشریه دانش آب و خاک، دوره ۲۴، شماره ۱، ش.ص. ۱۰۳-۱۱۳.
- [25] Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., & Michelsen, J. (2005). "Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile", *Journal of Fluid Mechanics*, 534, 351-401.
- [۲۶] بهمنش، ج.، خان محمدی، ن.، امیرعطایی، ب. (۱۳۹۵). "ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های تخمین پارامترهای مدل‌های نش و هیبرید به‌منظور مدل‌سازی فرآیند بارش - رواناب (مطالعه موردی: حوضه الوندچای)"، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۷، شماره ۱، ش.ص. ۲۵-۳۳.

E. Jabbari *

Assistant Professor, Faculty of
Engineering, University of
Qom.

e-mail: e.jabbari@qom.ac.ir

H. Karami

Assistant Professor, Faculty
of Civil Engineering,
Semnan University.

e-mail: hkarami@semnan.ac.ir

M. Molaiyard

M.Sc. Student, Faculty of
Engineering, University of
Qom.

e-mail: mmolaiy@semnan.ac.ir

Numerical Investigation of the Effect of a Hole in Bridge Pier on the Flow Characteristics Around Bridge Pier

The scour around the pier leads to bridge demolition. Therefore, the perception of the factors' behavior affecting the scour and the capability to predict this phenomenon can offer important information to bridge designers. The development of a hole inside the pier is one the proposed solutions for reducing pier scour. In order to a better perception of the mechanism of hollow performance and its effect on the flow hydrodynamic around the pier, the numerical modeling of flow around the pier having a circular section with and without hollow is accomplished in rigid bed. The characteristics of the flow around the pier with and without the hollow are compared by the available laboratory information and using the 3 dimensional Flow3D model. The results showed that the development of hollow in pier leads to wider vortices after the pier and it is expected that the scour depth decreases around the pier. According to the results of this study, the turbulence energy and the bed shear stress can be reduced to 20% and 56%. Based on results of shear stress and comparing it with the critical shear stress, it is predicted that the amount of scouring around the pier when a hollow is developed can be reduced. Also, holes cause the less flow separation and returns flow after pier.

Keywords: Scouring, Flow pattern, Pier, Hollow, Numerical modeling of Flow3D.

* Corresponding author