

## بررسی توزیع سرعت، الگوی جریان و آبشستگی پل رودخانه سیمینه رود

### ( اطراف پایه‌های ۱ تا ۳ )

غلامحسین اکبری<sup>۱\*</sup>، علی جعفری<sup>۲</sup>

(۱) هیئت علمی دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی آب، دانشگاه بجنورد، ایران

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی آب، دانشگاه بجنورد، ایران

\* نویسنده مسئول: akbari@ub.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۵

### چکیده

تأثیر پدیده آبشستگی بر روی سازه‌های آبی از جمله پل‌ها، از مباحث مهم در مهندسی عمران و مهندسی رودخانه می‌باشد، پل‌ها از قدیمی‌ترین سازه‌های مهندسی هستند. یکی از مهمترین عوامل تخریب پل‌ها، مسئله آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های آن می‌باشد. این نوع فرسایش با حفره‌ای که در اطراف سازه شکل می‌گیرد، قابل شناسایی است. این حفره در صورت گسترش در عمق می‌تواند باعث خرابی و در نهایت ریزش پل گردد. برای بررسی دقیق جریان و پیش‌بینی آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل، نیاز به فهم دقیق الگوی جریان در اطراف پایه‌ها است. با شناخت کامل جریان می‌توان با حل معادلات حاکم، میدان جریان را به طور کامل مدل کرده و به همراه حل معادلات انتقال رسوب و با تکیه بر پیشرفت‌های چشمگیر در علم دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)<sup>۱</sup>، روش دقیق برای تخمین آبشستگی موضعی در اطراف این سازه‌ها بدست آورد. در تحقیق پیش رو، شبیه‌سازی انجام گرفته، با استفاده از نرم افزار Flow-3D که نرم‌افزاری توانمند در شبیه‌سازی آشفتگی جریان به صورت سه بعدی است صورت گرفته، برای این منظور با استفاده از مدل Shallow water، مشخصه‌های جریان شامل سطح آب، سرعت، فشار و غیره را در اثر عبور دبی با دوره بازگشت صد ساله ( $2723 \frac{m^3}{s}$ ) در محدوده ابتدای پل اول تا ۱۰۰ متر پایین‌دست پل رودخانه سیمینه‌رود محاسبه شد. سپس با استفاده از مدل Sediment scour به صورت سه بعدی به بررسی میزان توسعه‌ی فرآیند آبشستگی در اطراف پایه‌های ۱ تا ۳ پل رودخانه سیمینه‌رود پرداخته شد.

کلمات کلیدی: آبشستگی موضعی، پل رودخانه سیمینه‌رود، مدل Flow-3D.

<sup>۱</sup>-Computational Fluid Dynamics

## مقدمه

یکی از سازه‌هایی که تخریب آن عواقب جبران‌ناپذیری دارد پایه‌های پل می‌باشد. در سال‌های اخیر آبشستگی موضعی پایه‌های پل در طول جریان‌های سیلابی بیش از سایر عوامل باعث تخریب پل‌ها شده است و به همین دلیل، موضوع بسیاری از تحقیقات انجام شده در صد سال اخیر قرار گرفته و این موضوع سال‌هاست که ذهن محققین را به خود مشغول نموده است. امروزه اصول علمی طراحی سازه‌ای پل‌ها به خوبی شناخته شده است. ولی تاکنون تئوری واحدی جهت تخمین آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل وجود ندارد، که علت آن پیچیدگی مسئله آبشستگی می‌باشد (سیفی و همکاران، ۱۳۹۲). برخورد جریان به پایه طبق یک فرآیند پیچیده تبدیل به گردابه نعل اسبی و عامل جدایی جریان از پایه و ایجاد گردابه برخاستگی می‌گردد. طراحی، محاسبه و احداث پایه‌های پل، از مهمترین و حساس‌ترین مراحل یک پروژه پل‌سازی هستند، بخصوص وقتی که این پل در محل عبور یک رودخانه واقع شده باشد. در این زمان، طراح باید برای انتخاب طول و تعداد دهلنه‌ها و عمق حداقل پی پایه‌ها، اطلاعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی منطقه را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. از مهمترین مواردی که در این رابطه می‌توان به آن اشاره نمود، اطلاعات مربوط به میزان فرسایش بستر می‌باشد که در صورت در نظر نگرفتن آن، بایستی شاهد عواقب خطرناکی از جمله تهدید پایداری پل و نهایتاً تخریب آن بود (شفاعی بجستان، ۱۳۸۴). همه ساله پل‌های زیادی در سراسر جهان تخریب می‌شوند، تخریب این پل‌ها در مواردی ناشی از در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل‌ها می‌باشد. اغلب مشکلاتی که بعد از ساخت پایه‌ها با آنها مواجه می‌شویم، بعلت عدم توجه کامل و کافی به موضوعاتی مانند، پیش‌بینی بالادستی آب در بالادست پایه‌ها و یا تخمین آبشستگی در اطراف پایه‌ها و روش‌های کاهش آن است. برای تعیین عمق آبشستگی در مجاورت پایه‌ها نیاز به شناخت کافی این پدیده و الگوی جریان اطراف آن بوده تا با توجه به آن، روش مناسبی برای تخمین عمق آبشستگی، مشخص گردد. به طور معمول سه روش کاربردی برای تعیین و پیش‌بینی عمق آبشستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش‌ها عبارتند از: (صالحی نیشابوری و نصیری صالح، ۱۳۸۷).

## ۱- مدل‌های فیزیکی

۲- استفاده از تجهیزات ویژه و مجهز، به منظور رفتارسنجی آبشستگی ایجاد شده در محل پایه‌ها

## ۳- مدل‌های ریاضی و کامپیوتری

روش‌های اول و دوم روش‌هایی کاملاً تجربی بوده و بر مبنای آزمایش و مشاهده استوار هستند. روش دوم روش دقیقی است که بیشتر برای پایه‌های ساخته شده مناسب بوده و به کمک آن مشکلات موجود شناسایی شده و طرح مورد نظر در برابر تهدیدات آبشستگی محافظت و تقویت می‌گردد. عمده‌ترین مشکل در این رابطه، آن است که تجهیزات دارای قابلیت‌های رفتارسنجی آبشستگی مورد استفاده در این روش، بسیار گران و پرهزینه می‌باشند. بنابراین، بیشتر مطالعات و تحقیقات انجام

شده به صورت مدل فیزیکی بوده و معادلات مربوط به تعیین عمق آبشستگی نیز بر اساس این مدل‌ها ارائه شده‌اند. با استفاده از روش اول می‌توان رفتار و میزان آبشستگی را برای پایه‌های در دست احداث و پایه‌های ساخته شده بررسی نمود ولی متأسفانه نتایج حاصل از مدل‌های فیزیکی در اغلب موارد منطقی و قابل قبول نمی‌باشند، زیرا در این تحقیقات بسیاری از پیچیدگی‌های محدوده جریان در اطراف پایه‌ها بسیار ساده در نظر گرفته شده و از اغلب پارامترها صرف‌نظر می‌شود (صالحی نیشابوری و نصیری صالح، ۱۳۸۷). مقیاس‌های فیزیکی، خصوصیات جریان و شرایط مرزی در مدل‌های کوچک مقیاس (شرایط آزمایشگاهی) بایستی از پروتوتیپ<sup>۱</sup> یا شرایط واقعی و بر طبق قوانین تشابه هیدرولیکی استخراج شوند. تشابه هندسی معمولاً برای تمامی مدل‌های فیزیکی ضروری است. از طرفی تشابه رینولدزی برای مدل‌هایی که در آن‌ها جریان در اطراف اجسام صلب بررسی می‌شود و تشابه فرودی برای مدل‌های شامل جریان با سطح آزاد مطرح بوده و بایستی لحاظ گردند. ساده‌سازی ذکر شده و اینکه در مدل‌های فیزیکی از بسیاری پارامترها صرف‌نظر می‌شود به این علت است که در مدل فیزیکی آبشستگی در اطراف پایه‌ها، در نظر گرفتن تمام تشابهات مذکور ممکن و عملی نمی‌باشد. این روش اساساً مبتنی بر تئوری‌ها و روابط ریاضی بوده، به طوری که در ابتدا با استفاده از روابط مربوط به فرسایش و تئوری‌های ارائه شده در رابطه با هیدرولیک و آبشستگی پایه‌ها، یک مدل ریاضی تهیه می‌گردد. پس از این مرحله و با توجه به مدل ریاضی تهیه شده، یک مدل کامپیوتری که قابل انطباق با شرایط و حالات مختلف این پدیده باشد، ساخته می‌شود. (قاسم‌زاده و محمودیان شوشتری، ۱۳۹۲). در این تحقیق به بررسی آبشستگی در پایه‌های پل رودخانه سیمینه‌رود پرداخته شده است، در نرم‌افزار Flow-3D مدل Shallow water که یک مدل دو بعدی بوده، با هدف بررسی الگوی جریان در محدوده پل رودخانه سیمینه‌رود پرداخته شده است. و در نهایت با در دست داشتن وضعیت جریان به لحاظ عمق، سرعت و جهت جریان در اطراف پایه‌ها با مدل سه بعدی، آبشستگی در اطراف پایه‌ها ۱ تا ۳ مورد بررسی قرار گرفته است.

### معرفی نرم افزار Flow-3D

نرم‌افزار Flow-3D نرم‌افزاری چند جانبه و سازگار با شرایط پیچیده جریان در مدل‌سازی به صورت دو بعدی و سه بعدی است. این نرم‌افزار مختص دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است و توسط شرکت Flow Science ارائه شده است. روش حل معادلات در این نرم‌افزار بر اساس روش حجم محدود است. مدل‌های ریاضی از جمله ابزارهای توانمند در زمینه حل معادلات پیچیده مربوط به مکانیک سیالات هستند (رستمی، ۱۳۹۳). یکی از مدل‌های ریاضی رایج در دنیا که جهت حل مسائل پیچیده مرتبط با سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، نرم‌افزار Flow-3D است که توانایی حل پدیده‌های هیدرولیکی را داراست و تطابق مناسب نتایج این نرم‌افزار با نتایج آزمایش‌های مدل هیدرولیکی در تعدادی از پروژه‌های مورد

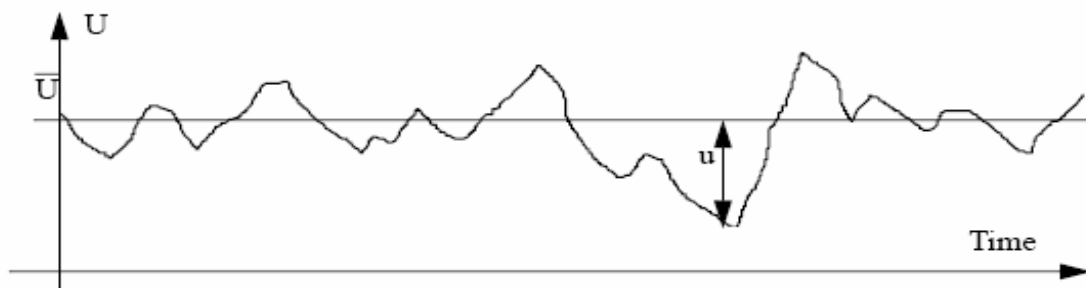
<sup>1</sup>-prototype

بررسی، موجب افزایش اطمینان در استفاده از این برنامه کامپیوتری شده است. این مدل عددی در جریان‌های سه بعدی غیرماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند نیز کاربرد دارد. نرم‌افزار Flow-3D توانایی نمایش تغییرات لحظه‌ای پارامترهای هیدرولیکی مختلف مانند عمق و سرعت در جهات مختلف و در هر مقطع دلخواه از سازه را به صورت فایل متنی یا گرافیکی داراست. نرم‌افزار Flow-3D معادلات حاکم بر حرکت سیال را با استفاده از تقریبات احجام محدود حل می‌کند. محیط جریان به شبکه‌هایی با سلول‌های لوله‌ای تقسیم‌بندی می‌شود که برای هر سلول مقادیر کمیت‌های وابسته وجود دارد. یعنی همه متغیرها در مرکز سلول محاسبه می‌شوند بجز سرعت که در مرکز وجوه سلول حساب می‌شود. در این نرم‌افزار از دو تکنیک عددی برای شبیه‌سازی هندسی استفاده شده است: ۱- روش حجم سیال (VOF): این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. ۲- روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR): برای شبیه‌سازی سطوح و اجسام صلب، مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد (سازمان مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۸۵).

### معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر جریان به معادلات سه بعدی ناویراستوکس معروف هستند. این معادلات که معرف سرعت جریان هستند، از تعادل نیروهای وارد بر یک حجم کوچک آب در جریان آرام بدست می‌آیند، سپس از روش میانگین رینولدز جهت تبدیل آنها برای جریان متلاطم استفاده می‌شود. روش میانگین رینولدز به شرح زیر است:

فرض کنید که ناظری مطابق شکل (۱) در یک زمان به منحنی سرعت در یک مکان مشخص (سرعت نقطه‌ای) در جریان متلاطم نگاه می‌کند. وی با مشاهده این منحنی، سرعت را به چند مولفه، سرعت متوسط و سرعت‌های نوسانی، تقسیم می‌نماید. با قرار دادن این متغیرها در معادله ناویراستوکس برای جریان آرام و مرتب‌سازی آنها، معادله ناویراستوکس برای جریان متلاطم بدست می‌آید (صدری، ۱۳۸۵).



شکل ۱: منحنی سرعت نقطه‌ای در جریان متلاطم

معادلات مورد استفاده این مدل جهت این تحقیق شامل اصل بقای جرم و اندازه حرکت به شرح زیر است.

### الف: معادله عمومی بقا جرم

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = RDIF + RSOR \quad \text{رابطه ۱:}$$

که در آن  $V_F$ : حجم سیال،  $\rho$ : دانسیته سیال،  $RSOR$ : ترم چشمه جرم است.  $u$ ،  $v$  و  $w$  به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در مختصات کارتزین  $(x, y, z)$  و یا مختصات استوانه‌ای  $(r, \theta, z)$  است.  $A_x$ ،  $A_y$  و  $A_z$  به ترتیب مساحت‌های المان در جهت عمود بر مؤلفه‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  است.

ضریب  $\xi$  و  $R$  مربوط به نوع سیستم مختصات بوده و در مختصات کارتزین  $R=1$  و  $\xi=0$  است. ترم اول ( $RDIF$ ) در سمت راست رابطه (۱) ترم دیفیوژن تلاطم بوده و عبارتست از:

$$RDIF = \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu \rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu \rho A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho \nu \rho A_x}{x} \quad \text{رابطه ۲:}$$

ضریب  $\nu$  برابر است با  $\frac{c_p \mu}{\rho}$  که  $\mu$  ضریب ویسکوزیته و  $c_p$  عدد اشمیت تلاطم است. این نوع دیفیوژن جرم مربوط به فرآیندهای اختلاط تلاطم در سیالات با دانسیته غیر یکنواخت است (ارونقی و همکاران، ۱۳۹۵).

### ب: معادلات اندازه حرکت

معادلات حرکت سیال در سه بعد شامل معادلات ناپراستوکس با پاره‌ای ترم‌های اضافه‌تر به شرح زیر هستند:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u \quad \text{رابطه ۳:}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] - \xi \frac{A_y v u}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial P}{\partial y} \right) + G_y + f_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v \quad \text{رابطه ۴:}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w \quad \text{رابطه ۵:}$$

که در آن  $G_x$  و  $G_y$ ،  $G_z$  شتاب‌های جرمی در جهات  $x, y, z$  و  $f_x$  و  $f_y$ ،  $f_z$  به ترتیب شتاب‌های گرانشی در جهات  $x, y, z$  بوده و از معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$\rho V_F f_x = w s_x - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right] \quad \text{رابطه ۶:}$$

$$\rho V_F f_y = w s_y - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x} (A_x - A_y \tau_{xy}) \right] \quad \text{رابطه ۷:}$$

$$\rho V_F f_z = w s_z - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \right] \quad \text{رابطه ۸:}$$

تنش‌های برشی  $\tau_{xx}$ ،  $\tau_{yy}$ ،  $\tau_{zz}$ ،  $\tau_{xy}$ ،  $\tau_{xz}$ ،  $\tau_{yz}$  در معادلات بالا، از معادلات زیر به دست می‌آیند.

$$\tau_{xx} = -2\mu \left[ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right] \quad \text{رابطه ۹:}$$

$$\tau_{yy} = -2\mu \left[ \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right] \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

$$\tau_{zz} = -2\mu \left[ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right] \quad \text{رابطه ۱۱:}$$

$$\tau_{xy} = -\mu \left[ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x} \right] \quad \text{رابطه ۱۲:}$$

$$\tau_{xz} = -\mu \left[ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad \text{رابطه ۱۳:}$$

$$\tau_{yz} = -\mu \left[ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right] \quad \text{رابطه ۱۴:}$$

برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار Flow-3D که یک نرم‌افزار برای دینامیک سیالات محاسباتی است، استفاده شده است. روش حل معادلات در این نرم‌افزار بر اساس حجم محدود هستند (آریانفر و شفاعی بجستان، ۱۳۸۷).

### انتقال رسوب

در این قسمت به شرح معادلات مورد استفاده در شبیه‌سازی فرسایش، انتقال و ته‌نشین شدن رسوبات در مدل FLOW-3D پرداخته می‌شود. مدل فرسایش و رسوب FLOW-3D موارد زیر را مدل می‌کند: (بشارتی گیوی و حکم‌زاده، ۱۳۸۷).

- محاسبه انتقال رسوبات معلق در جریان

- محاسبه ته‌نشینی رسوبات در اثر گرانش

- محاسبه ورود رسوبات به داخل جریان در اثر تنش برشی و آشفتگی جریان

- محاسبه انتقال مواد بستر در اثر غلتش یا جهش

در مدل FLOW-3D رسوبات به دو صورت می‌توانند وجود داشته باشند، رسوبات معلق و رسوبات متراکم. رسوبات معلق دارای غلظت پایین بوده و با سیال حرکت می‌کنند. رسوبات متراکم در محل تعریف شده توسط کاربر هستند و در اثر تنش برشی جریان در بستر شروع به حرکت می‌کنند. معادله انتقال هرگونه  $i$  ام از رسوبات معلق، بدون در نظر گرفتن توابع VOF و FAVOR عبارت است از:

$$+\nabla \cdot (\bar{u} c_{s,i}) = 0 \frac{\partial c_{s,i}}{\partial t} \quad \text{رابطه ۱۵:}$$

بطوریکه  $c_{s,i}$ ، غلظت رسوب معلق، در واحد جرم بر حجم واحد و  $\bar{u}$ ، سرعت متوسط مخلوط رسوب و سیال. از آنجا که دانسیته رسوبات از سیال اطرافش بیشتر است لذا ذرات رسوبی در داخل سیال منحرف خواهد شد، شدت این انحراف بستگی به تعادل بین نیروهای شناوری و دراک دارد (بهشتی و عطایی آشتیانی، ۱۳۸۳). بنابراین می توان رابطه تعادل مومنتم را برای هر ذره رسوب و مخلوط سیال و رسوب با صرف نظر کردن از توابع VOF و FAVOR نوشت:

$$-\frac{1}{\bar{\rho}} \nabla p + F \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = (\rho_s - \rho) \bar{u} \nabla_{s,i} = -\frac{1}{\rho_{s,i}} \nabla p + F - \frac{K_i}{f_{s,i} \rho_{s,i}} u_{r,i} \frac{\partial u_{s,i}}{\partial t} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

به طوری که  $u_{s,i}$ ، سرعت گونه  $i$  ام ذرات رسوبی،  $\rho_{s,i}$  دانسیته مواد رسوبی،  $f_{s,i}$  جز حجمی گونه  $i$  ام ذرات رسوبی،  $P$  فشار،  $K$  تابع دراک،  $F$  مجموع نیروی حجمی و نیروی لزجت و  $u_{r,i}$ ، سرعت نسبی است؛ که از رابطه (۱۷) محاسبه می شود:

$$u_{r,i} = u_{s,i} - u_f \quad \text{رابطه ۱۷}$$

سرعت متوسط نیز از رابطه (۱۸) قابل محاسبه است:

$$\bar{u} = \left( 1 - \sum_{i=1}^n f_{s,i} \right) u_f + \sum_{i=1}^n f_{s,i} u_{s,i} \quad \text{رابطه ۱۸}$$

به طوری که  $n$  عبارتست از تعداد کل گونه های ذرات رسوبی با کسر روابط فوق نتیجه زیر حاصل می شود :

$$\frac{\partial u_{drift,i}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla u_{drift,i} = \left( \frac{1}{\bar{\rho}} - \frac{1}{\rho_{s,i}} \right) \nabla P - \frac{K_i}{f_{s,i} \rho_{s,i}} u_{r,i} \quad \text{رابطه ۱۹}$$

به طوری که  $u_{drift,i} = u_{s,i} - \bar{u}$  و عبارت است از سرعت رانش این سرعت در محاسبه انحراف رسوب بکار می رود. این سرعت، با فرض اینکه حرکت هر ذره رسوب مستقل از بقیه ذرات است محاسبه می شود (رضاپوریان و همکاران، ۱۳۸۸). با فرض اینکه حرکت رسوبات در مقیاس زمان محاسباتی تقریباً ماندگار است و عبارت جابجایی مقدار ناچیزی دارد (یعنی برای سرعت های رانشی پایین) نتیجه رابطه بالا به شکل زیر خواهد بود:

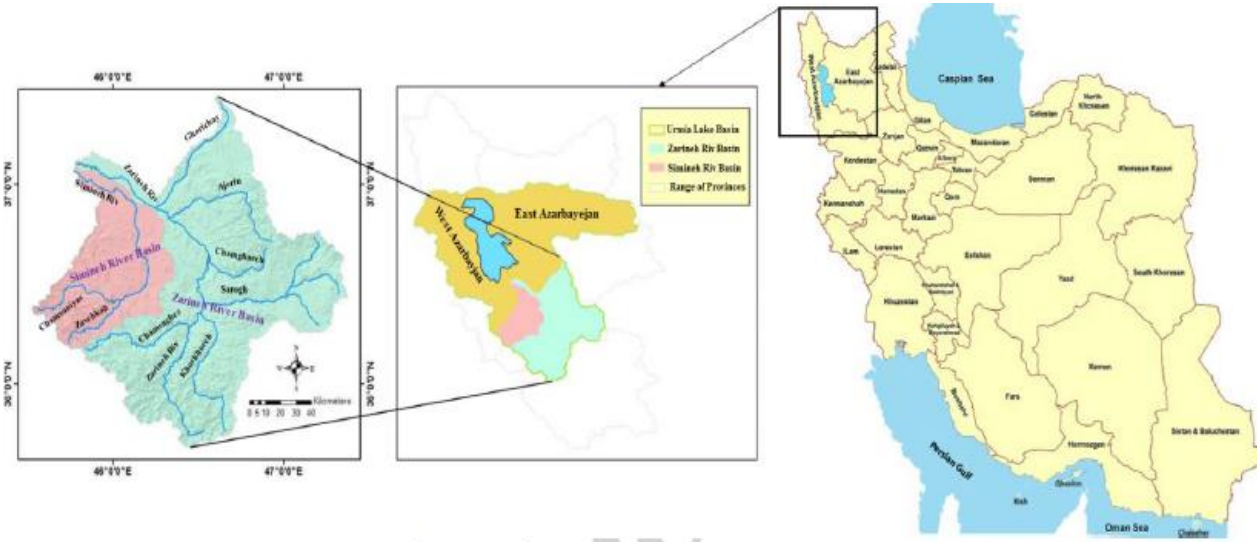
$$u_{r,i} = \frac{\nabla P}{\rho K_i} (\rho_{s,i} - \bar{\rho}) f_{s,i} \quad \text{رابطه ۲۰}$$

دانسیته متوسط مخلوط سیال و رسوب  $\bar{\rho}$  از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\bar{\rho} = \left( 1 - \sum_{i=1}^n f_{s,i} \right) \rho_f + \sum_{i=1}^n f_{s,i} \rho_{s,i} \quad \text{رابطه ۲۱}$$

## بررسی میدانی مدل

پل سیمینه رود مطابق شکل (۳) در روی رودخانه سیمینه رود ساخته شده و تنها پل ارتباطی بین میاندوآب و روستاهای اطراف و همچنین پل ارتباطی بین ارومیه و شهرهای مهاباد، نقده، پیرانشهر، سردشت و سایر شهرهای جنوب غربی استان آذربایجان غربی می باشد شکل (۲). این پل دارای ۷ ردیف پایه ۳ تایی است.



شکل ۲: حوضه رودخانه سیمینه رود به همراه شاخه های آن



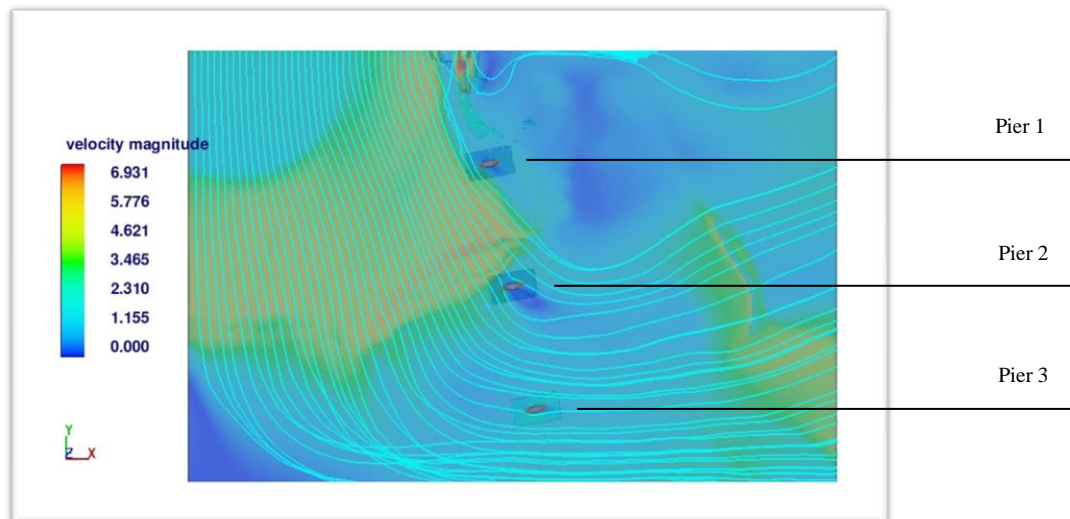
شکل ۳: نمایی از پل سیمینه رود



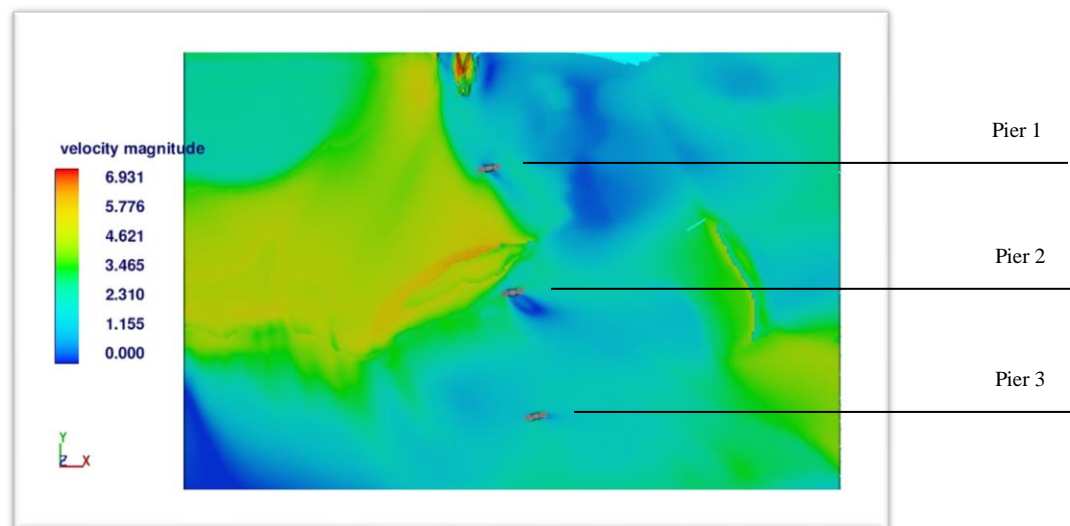
## نتایج و بحث

## بررسی توزیع سرعت و الگوی جریان

در یک روند عمومی در اثر برخورد مستقیم جریان با پایه یک برگشت و سکون جریان در بالادست پایه اتفاق می‌افتد. در اثر این برگشت جریان و برخورد مجدد آن با جریان اصلی، یک گرداب اولیه تشکیل می‌شود که شروع‌کننده آبستگی بالادست پایه پل است. در ادامه بخشی از جریان عبوری از پایه پل جدا می‌شود و در اثر همین جدایی جریان، دو محدوده سرعت‌های بیشینه در دو طرف پایه بوجود می‌آید که آبستگی اصلی و در واقع بیشترین آبستگی مربوط به این دو ناحیه دو طرف پایه است. در ادامه حرکت جریان در پایین‌دست پایه‌ها یک محدوده سرعت‌های کمینه بزرگ بوجود می‌آید که در پناه پایه پل و در اثر سکون جریان بین دو جریان پرسرعت طرفین پایه بوجود می‌آید، اکثر رسوبگذاری در این منطقه اتفاق می‌افتد و ذرات شسته شده از ناحیه بالادست و اطراف پایه در این ناحیه انباشته می‌شوند، این ناحیه مقداری به سمت پایین‌دست و در جهت جریان و بسته به هندسه پایه کشیده می‌شود و حالت شعله شمع را به خود می‌گیرد. شکل (۴)، جهت جریان در اطراف پایه‌های ۱ تا ۳ را به صورت سری و از نمای بالا نمایش می‌دهد، (جهت جریان از چپ به راست، پایه‌ها به ترتیب از بالا به پایین ۱، ۲ و ۳). شکل (۵)، توزیع سرعت در اطراف پایه‌های ۱ تا ۳ را نشان می‌دهد، با توجه به جهت جریان، در اثر برخورد جریان با سمت چپ پایه شماره ۱ و ۲، یک حالت سکون در آن ناحیه به وجود آمده است که با رنگ آبی نمایش داده شده و یک محدوده سرعت‌های کمینه کوچک را تشکیل داده است. و در قسمت سمت راست، در پناه پهنای پایه‌ها یک ناحیه آبی رنگ مقداری به سمت پایین دست در جهت جریان کشیده شده و حالت شعله شمع را به خود گرفته است که محل انباشت رسوبات می‌باشد. و همانگونه که ملاحظه می‌شود بین پایه‌های ۱ و ۲ به دلیل وضعیت قرارگیری پایه‌ها نسبت به جهت جریان و همچنین شکل آبراهه محدوده سرعت‌های بیشینه در آن مکان اتفاق افتاده است که بیشترین آبستگی در آن محدوده اتفاق خواهد افتاد. برای پایه شماره ۳ نیز دقیقاً همین اتفاق خواهد افتاد با این تفاوت که جریانی که با این پایه برخورد می‌کند تقریباً عمود بر پایه می‌باشد و محدوده سرعت‌های بیشینه برای آن در دو طرف پایه به رنگ سبز قابل رویت می‌باشد.



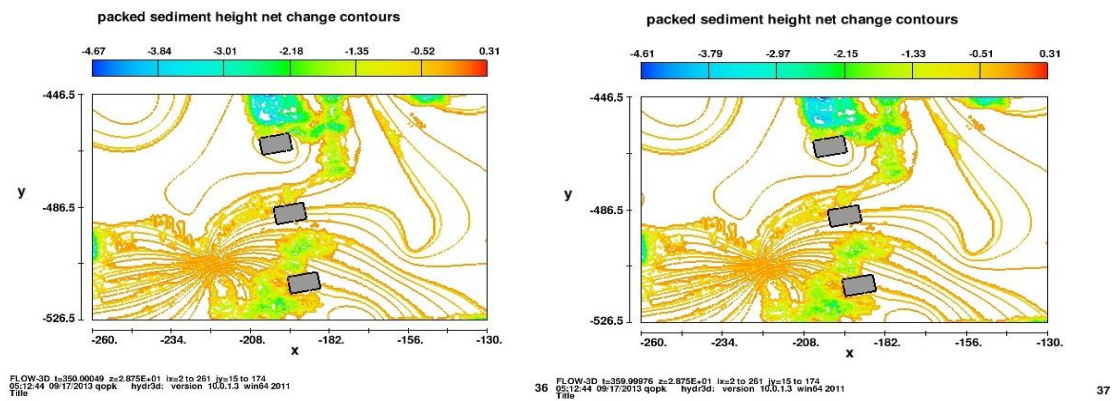
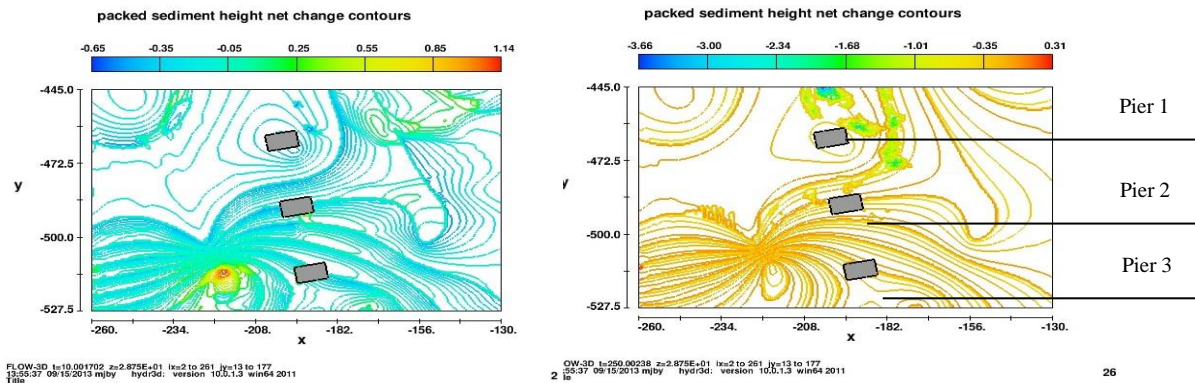
شکل ۴: نمایش خطوط جریان اطراف پایه‌های ۱ تا ۳ (جهت جریان از چپ به راست)



شکل ۵: نمایش توزیع سرعت اطراف پایه‌های ۱ تا ۳

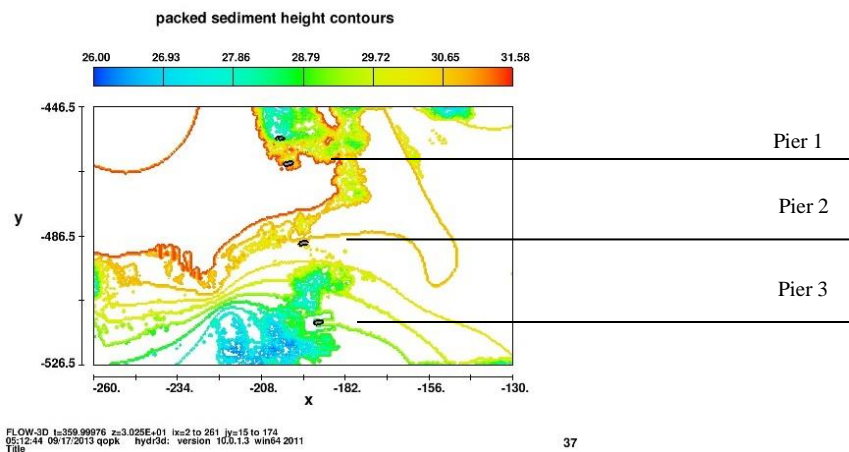
### بررسی آبشستگی

شکل (۶) خطوط هم ارتفاع مربوط به گودال آبشستگی بستر در اطراف پایه‌ها را در زمان‌های، به ترتیب از چپ به راست ۱۰ ثانیه، ۲۵۰ ثانیه، ۶۰۰ ثانیه و ۶۱۰ ثانیه را نشان می‌دهد. (در واقع زمان تعادل آبشستگی برای این محدوده ۶۱۰ ثانیه به دست آمد. به طوریکه مشاهده می‌شود حداکثر عمق آبشستگی بعد از ۶۱۰ ثانیه به اندازه ۴/۶۱ متر می‌باشد که در قسمت سمت چپ پایه شماره یک و بین جاده و پایه (بیشتر متمایل به سمت دماغه پل) اتفاق افتاده است. (لازم به ذکر است که ادامه مدل از زمان ۲۵۰ ثانیه به بعد از صفر شروع شده است و تا ۳۶۰ ثانیه ادامه داشته و جمعاً مدت زمان ۶۱۰ ثانیه محاسبات انجام شده است).



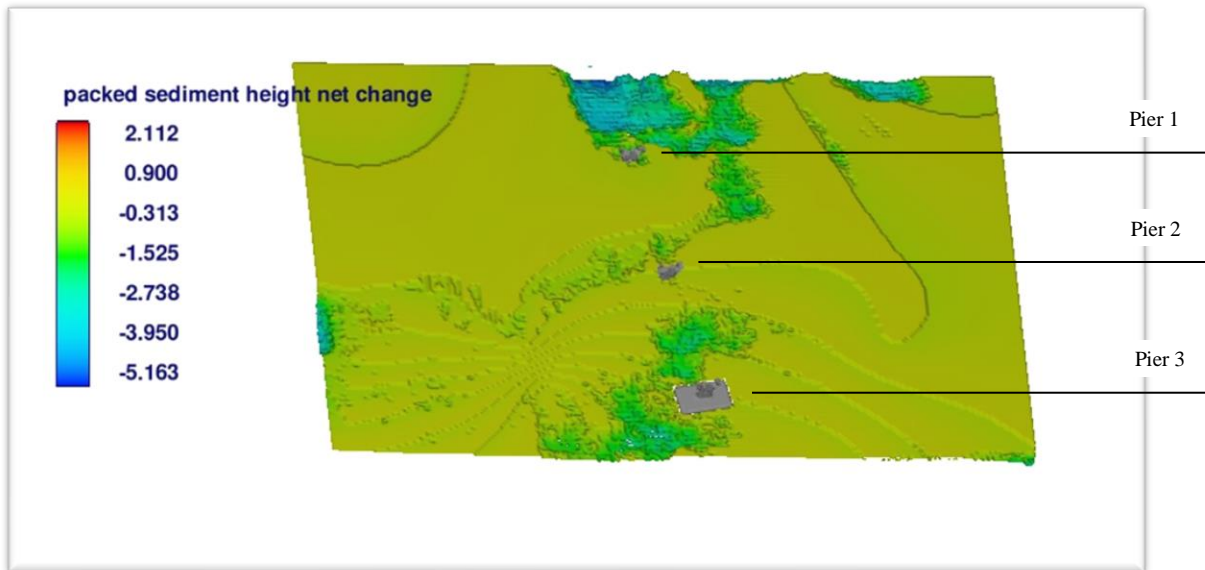
شکل ۶: خطوط هم ارتفاع مربوط به گودال آبشستگی بستر

شکل (۷)، تغییرات سطح بستر در اطراف پایه ۱، ۲ و ۳ را در زمان تعادل عمق آبشستگی را نشان می‌دهد. و همانگونه که مشاهده می‌شود کمترین ارتفاع سطح بستر به ۲۶ متر از سطح دریا در اطراف پایه شماره ۳ می‌رسد و با توجه به اینکه کف فوندانسیون‌ها در تراز ۲۸/۲ متر از سطح دریا قرار دارند. لذا پایه شماره ۳ در وضعیت بحرانی‌ای قرار می‌گیرد که باید برای آن چاره‌ای برای جلوگیری از تخریب اندیشیده شود.



شکل ۷: تغییرات سطح بستر در اطراف پایه ۱ تا ۳

شکل (۸)، نمای سه بعدی از آبشستگی و رسوب گذاری در اطراف پایه های ۱، ۲ و ۳ را نشان می دهد.



شکل ۸: نمای ۳ بعدی از آبشستگی در اطراف پایه های ۱ تا ۳

مقایسه وضعیت کنونی با مدل، پایه های ۱ تا ۳:

شکل (۹) نمایی از وضعیت کنونی پایه ۲ را نشان می دهد. همانگونه که از آبشستگی قسمت سمت چپ پایه که یک لایه آسفالت و بستر زیر آن شسته شده در شکل مشخص است، جهت جریان به صورت عمود به پایه وارد نشده بلکه بر اساس الگوی جریان که در شکل (۵ و ۴) نشان داده شده با زاویه بوده است.



شکل ۹: نمایی از وضعیت کنونی و مدل در پایه شماره ۲

## نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ارائه شده، الگوی جریان، توزیع سرعت و آبشستگی در اطراف پایه‌ها با مدل عددی سه بعدی Flow-3D شبیه‌سازی و پس از بررسی و مقایسه خروجی‌ها، یافته‌های این تحقیق پیرامون پدیده آبشستگی اطراف پایه‌های پل دوم رودخانه سیمینه رود به شرح زیر بیان می‌گردد:

۱. جریان رودخانه به صورت عمود از بین پایه‌های ۱ تا ۳ عبور نمی‌کند، که این امر به دلیل وجود دیواره منتهی الیه سمت چپ پل می‌باشد، که مانند یک مانع در مسیر عبور جریان قرار داشته و جریان را به سمت راست پل منحرف و با زاویه نسبت به پایه‌های پل از بین آنها عبور می‌کند.
۲. ارتفاع بستر در محدوده پشت پایه شماره ۱ به ۲۶ متر می‌رسد که می‌تواند به تخریب سریعتر پل منجر شود.
۳. جریان عبوری از بین پایه‌های شماره ۱ و ۲ باعث ایجاد یک فرسایش شدید در آن محدوده می‌شود که ارتفاع بستر در آن محدوده را به تراز ۲۶/۵ متر می‌رساند که از عمر مفید پل می‌کاهد.
۴. پل در یک پیچانرود ساخته شده است که ارتفاع سطح آب در قوس خارجی نسبت به قوس داخلی بیشتر می‌باشد.
۵. نتایج مربوط به آبشستگی نشان می‌دهد با توجه به پیچیده بودن تحلیل آبشستگی، نرم افزار Flow-3D مدل مناسبی برای تحلیل آبشستگی در پایه پل‌ها می‌باشد.

## منابع

- ارونقی، ه.، فرسادی زاده، د.، حسین‌زاده دلیر، ع. و فاخری فرد، ا. (۱۳۹۵). تعیین ابعاد طوق مستطیلی در کاهش آبشستگی پایه پل. مجله دانش آب و خاک، دوره ۱۹، شماره ۱، ص ۶۴ - ۵۱.
- آریانفر، ع. و شفاعی بجستان، م. (۱۳۸۷). بررسی توزیع تنش برشی در محدوده پایه‌های پل شکاف‌دار توسط مدل FLUENT. هفتمین کنفرانس هیدرولیک/ایران. دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور. ۲۱ آبان ۱۳۸۷، تهران، ایران.
- بشارتی گیوی، م. و حکیم‌زاده، ح. (۱۳۸۷). بررسی عددی سه بعدی الگوی جریان و تنش برشی بستر اطراف پایه‌های مخروطی. نشریه مهندسی دریا، دوره ۶، شماره ۱۱، ص ۲۴ - ۱۶.
- بهشتی، ع. و عطایی آشتیانی، ب. (۱۳۸۳). آبشستگی در شرایط آب صاف در اطراف گروه پایه. اولین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی شریف. ۲۲ تا ۲۴ اردیبهشت ۱۳۸۳، تهران، ایران.

رستمی، ف. (۱۳۹۳). مطالعه عددی جریان زیر و فوق بحرانی از دریاچه سد به سرریز تنداب منتهی به حوضچه آرامش پرش هیدرولیکی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، چاپ نشده، دانشکده عمران.

رضاپوریان، س.، صمدی بروجنی، ح. و قربانی، ب. (۱۳۸۸). بررسی آزمایشگاهی تعیین موقعیت مناسب سری پره‌های مستغرق در کنترل آبشستگی پای پل‌ها. هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. انجمن هیدرولیک ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران. ۲۴ آذر ۱۳۸۸، تهران، ایران.

سازمان مدیریت منابع آب ایران، (۱۳۸۵). راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی. ۱۵۰ص.

سرورام، ح.، حسن زاده، ی. و حکیم‌زاده، ح. (۱۳۹۸). بررسی توزیع سرعت جریان در اطراف پایه پل با استفاده از مدل عددی. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه شیراز. ۲۱ اردیبهشت ۱۳۸۸، شیراز، ایران.

سیفی، ا.، نجفی، س. و ریاحی، ح. (۱۳۹۲). طراحی و مدل‌سازی دینامیک سیالات و تحلیل نتایج در Flow-3D. چاپ اول، انتشارات اندیشه سرا، تهران، ۳۰۴ص.

شفاعی بجستان، م. (۱۳۸۴). هیدرولیک انتقال رسوب. چاپ سوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۴۹۶ص.

صالحی نیشابوری، ع. و نصیری صالح، ف. (۱۳۸۷). مدل‌های آشفتگی و کاربرد آنها در هیدرولیک. چاپ اول، پژوهشکده مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس: تهران، ۱۸۶ص.

صدری، ع. (۱۳۸۵). گزارش نهایی برداشت اصولی شن و ماسه از رودخانه سیمینه رود. مجری: دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی معدن، متالوژی و نفت.

قاسم‌زاده، ف. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی مسایل هیدرولیکی در Flow-3D. چاپ اول، انتشارات نوآور، تهران، ۲۵۶ص.

محمودیان شوشتری، م. (۱۳۹۲). اصول جریان در مجاری باز. جلد اول. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز، ۵۱۳ص.

نوری فر، م.، مغربی، م.، حسن‌زاده، ی. و نورانی، و. (۱۳۸۹). بررسی عددی عملکرد شکاف پایه در پایه‌های استوانه‌ای پل تحت شرایط جریان با زاویه برخورد گوناگون. مجموعه مقالات نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه تربیت مدرس. ۱۸ تا ۲۰ آبان ۱۳۸۹، تهران، ایران.

**Abdo, M.I. (1993).** Effect of sediment gradation and coarse material fraction on clear water scour around bridge piers. PhD Dissertatio, Department of Civil Engineering, Colorado State University, 205 pp.

**Ali, K.H.M. and Karim, O. (2013).** Simulation of flow around pier. journal Of Hydraulic Research, IAHR, 40(2), pp: 161-174.

**Babaeyan-Koopaei, k. (2015).** A Study of straight stable channels and their interactions with bridge structures. PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne, UK.

**Breusers, H.N.C., Nicollet, G. and shen, H.W. (1998).** Local scour around cylindrical piers. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 15(3), pp:211-252.

**Breusers, N.H.C and Raudkivi, A.J. (2008).** Scouring 2nd Hydraulic Structures Design Manual. IRHR, AA Balkema Rotterdam The Netherlands.

## **Investigating the speed distribution, flow pattern, and scouring of the Simineh Rood River Bridge (Around the piers of 1-3)**

Gholamhosein Akbari<sup>1\*</sup> and Ali Jafari<sup>2</sup>

- 1) Associate Professor, Civil Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran
- 2) Master Student of Technical and Engineering, Water Engineering Department, Bojnord University, Iran

\*Correspondence author: akbari@ub.ac.ir

**Received Data: 2023. 07. 16**

**Accepted Data: 2023. 09.11**

### **Abstract**

The effect of scour on water structures, including bridges, is one of the important topics in civil engineering and river engineering. Bridges are one of the oldest engineering structures. One of the most important factors in the destruction of bridges is the problem of local scour around its piers. This type of scour can be recognized by the hole that forms around the structure. If this hole expands in depth, it can cause damage and eventually collapse of the bridge. To accurately check the flow and predict the local scour around the bridge piers, it is necessary to have a precise understanding of the flow pattern around the piers. By fully understanding the flow, the flow field can be completely modeled by solving the governing equations, along with solving the sediment transport equations and relying on significant advances in Computational Fluid Dynamics (CFD), an accurate method to estimate local scour. Around these structures. In this research, the simulation has been done using Flow-3D software, which is capable of simulating flow turbulence in three dimensions. For this purpose, using the Shallow water model, the characteristics of the flow, including water level, velocity, pressure, etc., due to the flow of discharge with a return period of 100 years (2723 m<sup>3</sup>/s) in the area of the beginning of the first bridge to 100 meters downstream of the Simineh Rood River Bridge was calculated. Then, using the Sediment scour model in three dimensions, the rate of development of the scouring process was investigated around piers 1 to 3 of the Simineh Rood River Bridge.

**Keywords:** Flow-3D model, Local scour, Simineh Rood River Bridge