علوم و مهندسی آبیار
جلد ۴۱، شماره‌ی ۱، بهار ۹۷، ص. ۱۶۳-۱۴۷

# تأثیر پایه پل دایره‌ای بر آبشستگی موضعی در محدوده تلاقی ۶۰ درجه با استفاده از مدل سه بعدی SSIIM1

رسول قبادیان[1*]، مهسا بصیری[2] و زهرا صیدی تبار[3]

۱*- نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی. rsghobadian@gmail.com
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی.
۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی.

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۱۴

## چکیده

**وقوع آبشستگی در اطراف پایه‌های پل یکی از عمده‌ترین دلایل تخریب پل‌ها است. این پدیده عموماً در آبراهه‌های مستقیم مورد بررسی قرار گرفته است و کمتر به مطالعه پایه پل در محل تلاقی رودخانه‌ها پرداخته شده است. به همین دلیل در این تحقیق با استفاده از مدل عددی SSIIM1 ابتدا الگوی جریان و رسوب‌گذاری در یک تلاقی ۶۰ درجه شبیه‌سازی و مدل با داده‌های اندازه‌گیری صحت‌سنجی شد. سپس به بررسی تأثیر وجود پایه پل با شعاع نسبی (r/w؛ r=شعاع پایه، w=عرض کانال اصلی) ۰/۰۵ ، ۰/۱ ، ۰/۱۵ و ۰/۲ در محدوده تلاقی بر الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری پرداخته شد. نتایج نشان داد تطابق خوبی بین سرعت‌های افقی محاسبه شده توسط مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد. همچنین مدل توانایی نسبتاً خوبی، را در پیش‌بینی موقعیت و مقدار حداکثر عمق فرسایش دارد (خطایی کمتر از ۱۰ درصد) ولی ارتفاع رسوب‌گذاری را بیشتر از مقدار آزمایشگاهی برآورد می‌کند. علاوه بر این نتایج نشان داد که وقتی پایه پل کوچک است (۰/۱ و r/w=۰/۰۵) به دلیل کاهش اختلاف سطح‌آب بالادست و پایین‌دست کانال‌اصلی نسبت به حالت بدون پایه، وجود پایه پل باعث کاهش عمق آبشستگی در محدوده تلاقی می‌گردد. این کاهش برای شعاع‌های نسبی ۰/۰۵ و ۰/۱ به ترتیب ۳۸ و ٦ درصد به‌دست آمد. در حالی‌که وقتی شعاع پایه‌پل بزرگ است (۰/۱۵ و r/w=۰/۲) کاهش عرض موثر عبور جریان باعث تشدید آبشستگی در محدوده تلاقی و اطراف پایه می‌گردد. این افزایش برای شعاع های نسبی ۰/۱۵ و ۰/۲ به ترتیب ۱۷ و ٦٨ درصد به‌دست آمد.**

**کلید واژه‌ها:** آبشستگی موضعی، پایه پل، تلاقی کانال‌های روباز، شعاع نسبی، SSIIM1 .

## مقدمه

آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل، یکی از مهمترین عوامل تخریب کننده پل‌ها محسوب می‌شود. آبشستگی پدیده‌ای طبیعی است که در نتیجه عمل فرسایش بستر توسط جریان آب و حمل مواد جدا شده از کف و دیواره‌های رودخانه‌ها و اطراف پایه‌ها و تکیه گاه پل‌ها رخ می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌های پل در اثر یک سیستم گردابی بوجود می‌آید. این سیستم گردابی در اثر انحراف جریان توسط پایه‌ها ایجاد می‌شود. سیستم‌اصلی گردابی که به تشکیل حفره‌های آبشستگی کمک می‌کند، از برخورد جریان به جلو پایه و انحراف آن به طرف پایین ایجاد می‌شود. جریان رو به پایین پس از برخورد به بستر رودخانه در جلو پایه گودالی را حفر می‌کند که در داخل این گودال جریان چرخشی ایجاد شده و به تدریج عمق حفره اضافه می‌شود. جریان چرخشی درجلو پایه به دو طرف پایه نیز امتداد می‌یابد و شکلی به خود می‌گیرد که در پلان شبیه نعل اسب است، از این رو به آن گرداب نعل اسبی گفته می‌شود. در اثر عبور جریان از کنار پایه یک سری جریان‌های ثانویه رخ می‌دهند که این جریان‌های ثانویه عامل اصلی ایجاد آبشستگی موضعی می‌باشند (Homayoon, 2009).

Yarnell (1934) یکی از نخستین محققانی بود که به بررسی تأثیر پایه پل با اشکال مختلف بر خصوصیات جریان و بخصوص میزان بالازدگی سطح آب در بالادست پایه‌ها پرداخت. او هم‌چنین رابطه ای را برای تعیین میزان حداکثر بالا آمدگی جریان در اثر برخورد با پایه پل ارائه کرد.

Irman, Salaheldin و Chaudhry (2004) با استفاده دو مدل آشفتگی $K-\varepsilon$ و RMS الگوی جریان و تنش برشی اطراف پایه‌های پل را شبیه سازی و با نتایج مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل RMS در مقایسه با مدل $K-\varepsilon$ توزیع دقیق‌تری از تنش‌های برشی را ارائه می‌دهد.

Heron (2007) جریان حول پایه‌های پل با مقطع دایره‌ای با قطرهای مختلف را به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار داد. او در تحقیق خویش تأثیر سرعت جریان در پایین دست پایه، تشکیل

گردابه‌ها و نحوه انتشار آن‌ها در اطراف پایه‌های پل را مورد بررسی قرار داد. نتایج او نشان داد که اندازه و گردابه‌های ایجاد شده متناسب با قطر پایه پل است. همچنین نتایج نشان داد که تعداد، شکل و فاصله بین پایه‌ها از عواملی است که باعث تغییر گردابه ایجاد شده می‌شود.

Raikar،Dey و Roy (2008) با انجام آزمایش‌هایی عمق آبشستگی در شرایط آب زلال را در اطراف پایه‌های استوانه‌ای مستغرق و غیرمستغرق در شرایط یکسان جریان و رسوب مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت استغراق، عمق آبشستگی و همچنین ابعاد و قدرت گردابه‌های نعل اسبی کاهش می‌یابد.

Ghenim، Seddini و Guemou (2008) به بررسی عددی تأثیر شکل پایه پل بر تنش برشی بستر پرداختند. آن‌ها پایه پل با مقاطع دایره‌ای و مستطیلی گردگوشه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در تمامی حالات تنش برشی ماکزیمم در مجاورت پایه پل و در حد فاصل زوایای ۷۵ و ۳۳۵ درجه نسبت به محور کانال اصلی و به صورت متقارن می‌باشد.

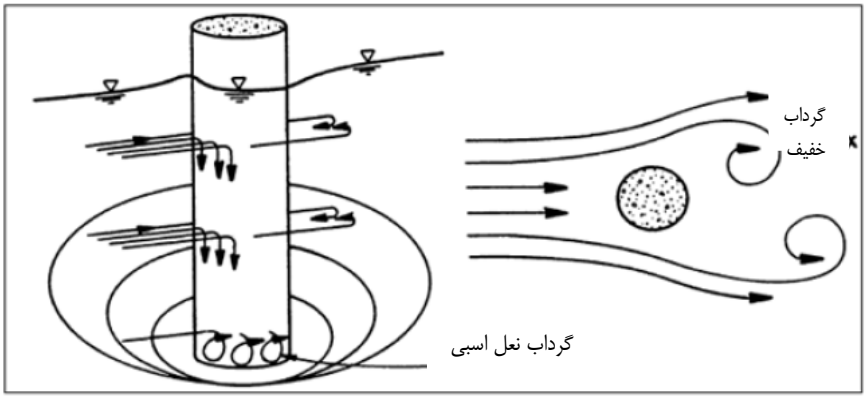
Tabib zadeh et al. (2005) با استفاده از مدل SSIIM1 آبشستگی اطراف پایه‌پل با مقطع دایره‌ای را شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل از دقت بالایی در پیش‌بینی آبشستگی و رسوب‌گذاری اطراف پایه پل برخوردار است و به‌خاطر در نظر گرفتن جریان‌های روبه پایین در جلوی پایه و گردابه‌های نعل اسبی در اطراف پایه در محاسبات تغییرات بستر می‌تواند حداکثر عمق آبشستگی اطراف پایه پل را به خوبی تخمین بزند.

Esmaeili، Kharaghnis و Dehghani (2009) با استفاده از مدل SSIIM1 به مطالعه و بررسی عددی آبشستگی اطراف پایه‌های پل تحت جریان های غیر ماندگار پرداختند. آن‌ها آبشستگی اطراف پایه استوانه‌ای را تحت هیدروگراف جریان شبیه‌سازی کردند و برای صحت سنجی مدل خود از نتایج آزمایشگاهی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل SSIIM1 می‌تواند آبشستگی در شاخه صعودی هیدروگراف را با دقت مناسبی و خطایی کمتر از ۲۰ ٪ شبیه‌سازی کند.

Hassanzadeh، Hakimzadeh و Ayari (2011) به بررسی تأثیر اشکال مختلف پایه پل بر الگوی جریان با استفاده از مدل عددی فلوئنت پرداختند. آن‌ها پایه پل با اشکال مختلف دایره‌ای، دوکی، بیضی، مستطیلی، مربعی و مستطیلی گردگوشه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقاطع دوکی و بیضی شکل به دلیل اینکه جریان با تغییرات بسیار کمی از اطراف این مقاطع می‌گذرد و آشفتگی زیادی ایجاد نمی‌کند بهترین نوع مقطع در کاهش تنش برشی و در نتیجه کاهش آبشستگی بستر می‌باشند.

Saneie و Mohamadnejad (2012) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر قطر پایه پل استوانه‌ای بر آبشستگی پرداختند. آن‌ها با قرار دادن پایه پل در یک فلوم مستطیلی به بررسی تأثیر سه قطر پایه ۲۱، ۳۰ و ۴۰ میلیمتری و دبی‌های ۱۱ ، ۱۰/۵، ۱۰، ۹/۵ و ۹ لیتر در ثانیه بر آبشستگی و رسوب‌گذاری پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش ۹۰٪ قطر پایه پل (از قطر ۲۱ به ۴۰ میلیمتری)، عمق آبشستگی و ارتفاع تپه رسوب‌گذاری به ترتیب ۱۸۵ و ۷۰٪ افزایش می‌یابد.

Ghobadian، Basiri و Seydi Tabar (2014) با استفاده از مدلSSIIM1 به بررسی تأثیر پایه پل دایره‌ای بر الگوی جریان در محدوده تلاقی ۹۰ درجه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که وجود پایه پل در محدوده تلاقی باعث برگشت آب در مقاطع بالادست پایه پل شده که همین امر سبب کاهش سرعت‌های افقی در کانال اصلی و تنش برشی بستر می‌شود. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد که موقعیت محل تنش برشی حداکثر از مقابل ناحیه جداشدگی جریان و نزدیک مرکز کانال اصلی در شرایط بدون پایه، به سمت کناره‌های پایه ها در شرایط وجود پایه پل منتقل می‌شود.




**شکل ۱- خطوط جریان و گردابه‌های ناشی از اثر جریان در اطراف یک پایه‌ی قائم استوانه‌ای (Homayoon, 2009)**

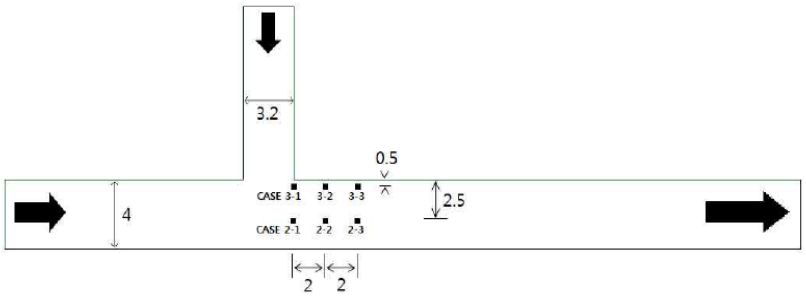
Park، Jang و Choi (2014) با استفاده از نرم‌افزار مایک۳ ابتدا الگوی جریان و رسوب‌گذاری را در یک تلاقی ۹۰ درجه و در سه نسبت دبی مختلف (۰/۲: ۱، ۰/۳۵: ۱ و ۰/۵: ۱ ؛ نسبت دبی کانال فرعی: اصلی) بررسی نمودند. سپس با قرار دادن پایه پل در نواحی حداکثر سرعت و رکود جریان و در سه موقعیت صفر، نیم و یک برابر پهنای کانال از گوشه پایین‌دست اتصال به بررسی خصوصیات جریان و حداکثر عمق آبشستگی پرداختند (شکل ۲). نتایج آن‌ها نشان داد که در حالت بدون پایه پل با افزایش دبی شاخه فرعی حداکثر سرعت و فرسایش در کانال اصلی افزایش می‌یابد. نتایج مربوط به قرار دادن پایه نیز نشان داد که وقتی پایه پل در ناحیه حداکثر سرعت قرار دارد با تغییر موقعیت از گوشه تلاقی به پایین دست کانال حداکثر سرعت و عمق فرسایش کاهش می‌یابد.

علی‌رغم مطالعات عددی نسبتاً زیادی که در زمینه شبیه‌سازی جریان و رسوب در محدوده تلاقی کانال‌ها و آبشستگی اطراف پایه‌های پل با اشکال مختلف انجام شده است، کمتر به بررسی همزمان این دو پرداخته شده‌است. از آنجا که مدل عددیSSIIM1 یکی از مدل‌های توانمند در خصوص شبیه‌سازی جریان و رسوب در رودخانه‌ها و مجاری روباز می‌باشد، این تحقیق به منظور بررسی توانایی آن در شبیه‌سازی الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری اطراف پایه دایره‌ای در محدوده تلاقی ۶۰ درجه دو کانال مستطیلی انجام شد. به همین منظور ابتدا مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی Ghobadian (2006) برای الگوی جریان و سپس الگوی فرسایش و رسوبگذاری در یک تلاقی ۶۰ درجه صحت‌سنجی شد. سپس با قرار دادن پایه پل در فاصله‌ی نیم برابری پهنای کانال اصلی از گوشه پایین‌دست تلاقی و در مرکز کانال اصلی به بررسی تأثیر وجود پایه پل دایره‌ای شکل با شعاع نسبی (r/w؛ r=شعاع پایه، w=عرض کانال اصلی) ۰/۰۵ ، ۰/۱ ، ۰/۱۵ و ۰/۲ در محدوده تلاقی بر الگوی فرسایش و رسوبگذاری پرداخته شد. لازم به ذکر است که انتخاب این نقطه به این خاطر است که این نقطه در ناحیه حداکثر سرعت قرار دارد.

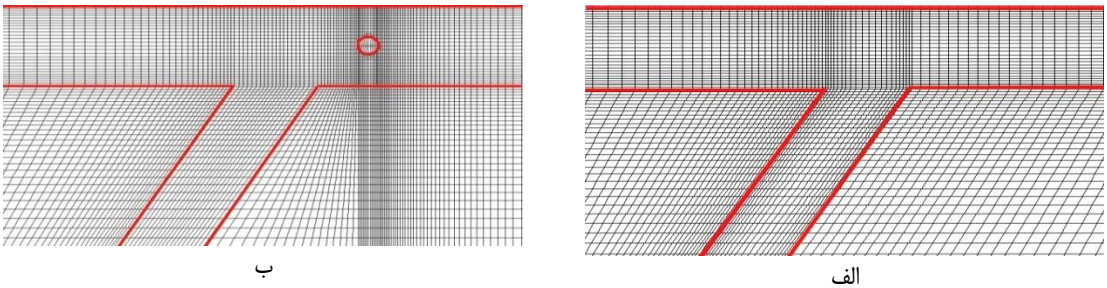
## مواد و روش‌ها

### معادله‌های حاکم

در این تحقیق از مدل عددی SSIIM1 برای شبیه‌سازی جریان و رسوب در تلاقی دو کانال مستطیلی‌روباز استفاده شد. مدل مذکور از یک شبکه ساختار استفاده می‌کند. همان‌گونه که در شکل (۳) نشان داده شده است هندسه میدان مورد مطالعه در این تحقیق به گونه‌ای تعریف شده که در نواحی نزدیک به دیواره که گرادیان‌ها شدیدتر می‌باشد (به منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر) شبکه‌بندی ریزتری مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که خود نرم افزار SSIIM1 قادر به تولید فایل هندسه محدوده نیست و در تحقیق حاضر فایل کوردینا (Koordina) توسط برنامه‌ای به زبان ویژوال بیسیک(Visual Basic) برای مدل تهیه شده است. سپس به بررسی تأثیر پایه پل بر آبشستگی موضعی در محدوده تلاقی پرداخته شد. در این حالت نیز مش‌بندی به گونه‌ای تعریف شد که با نزدیک شدن به محل پایه پل مش ریزتر و دقت انجام محاسبات بالا رود. قسمتی از مش ساخته شده برای تلاقی مذکور بدون پایه پل و با پایه پل در شکل (۳) آمده است.




**شکل ۲- موقعیت‌های پایه پل در مطالعه Park ، Jang و Choi (2014)**



ب الف

**شکل ۳- مش ساخته شده برای محدوده مورد مطالعه الف) بدون پایه پل ب) با پایه پل**

**معادلات حاکم بر میدان جریان**

در مدل مذکور معادلات ناویر – استوکس برای جریان آشفته در یک فضای سه بعدی به منظور محاسبه سرعت جریان با روش احجام محدود منفصل و حل می‌شوند:

$$j = 1,2,3 \qquad \frac{\partial U_j}{\partial X_j} = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}(-P\delta_{ij} - \rho\overline{u_i u_j}) \qquad (۲)$$

که در آن $U$ : سرعت متوسط ، $\rho$: وزن واحد حجم آب، $P$: فشار ، $\delta_{ij}$: دلتای کرونکر است که اگر i=j باشد برابر است با یک و در غیر این صورت معادل صفر است و x: بعد عمومی مسافت است. آخرین جمله در معادله (۲) تنش رینولدز است که اغلب باتقریب بوزینسک مدل می‌شود:

$$\rho\overline{u_i u_j} = \rho\upsilon_t\left(\frac{\delta U_i}{\partial x_j} + \frac{\delta U_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho.k.\delta_{ij} \qquad (۳)$$

که در آن $\upsilon_t$: لزجت گردابی و $k$: انرژی جنبشی اغتشاش است. لزجت گردابی بستگی به انرژی جنبشی اغتشاش ( $k$ ) و اتلاف اغتشاش ( $\varepsilon$ ) دارد:

$$\upsilon_t = C'_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۴)$$

در مدل SSIIM1 مقادیر $k$ و $\varepsilon$ با استفاده از مدل‌های دو معادله ای $K-\varepsilon$ استاندارد بدست می‌آیند.

**شرایط مرزی**

شرایط مرزی دریچلت به عنوان شرایط مرزی برای جریان‌های ورودی در نظر گرفته شده است. این شرایط برای سرعت‌ها به کار برده می‌شود و اغلب مشکل است که از آن برای اغتشاش استفاده شود. معمولاً از یک مدل اغتشاش ساده ( $\upsilon_t = 0.11u^*h$ ) یا ( $\upsilon_t = 0.067u^*h$ ) برای تعیین لزجت گردابی در مقطع ورودی استفاده می‌شود. با معلوم بودن سرعت در مرز خروجی شرایط گرادیان صفر برای تمام پارامترها به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده است.

سطح آب با استفاده از روش سرپوش ثابت به همراه گرادیان صفر برای همه متغیرها تعیین شده است. موقعیت سرپوش ثابت و جابجائی آن به عنوان تابعی از زمان و میدان جریان، به وسیله فشار و الگوریتم برنولی محاسبه می‌شود. از قانون دیوار برای مرزهای زبر به عنوان شرط مرزی در بستر و دیوارها استفاده شد.

**معادلات حاکم بر محاسبات انتقال رسوب**

مدل عددی SSIIM مقدار بار معلق را با استفاده از معادله جابجایی -پخش برای غلظت رسوب ( $C$ ) محاسبه می‌کند:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j\frac{\partial c}{\partial x_j} + w\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma\frac{\partial c}{\partial x_j}) \qquad (۵)$$

که در آن $c$: غلظت رسوب، $w$: سرعت سقوط ذره رسوب، $l$:بعد در جهت عمودی، $\Gamma$:ضریب دیفیوژن است که برابر با لزجت گردابی است که از معادله $K-\varepsilon$ بدست می‌آید.

رابطه (۵) روی همه سلول ها بجز نزدیکترین سلول بستر حل می‌شود. سلول هایی که در آن غلظت در شرایط تعادل باشد از رابطه Van Rijn (1984) به‌دست می‌آید:

$$c_{bed} = 0.015\frac{d}{a}\frac{(\frac{\tau_b-\tau_c}{\tau_c})^{1.5}}{\left(d(\frac{(\rho_s-\rho_w)g}{\rho_w\upsilon^2})^{1/3}\right)^{0.3}} \qquad (۶)$$

که در آن $d$: قطر ذره رسوب ، $a$:سطح مرجع ، $\tau_b$:تنش برشی کف ، $\tau_c$:تنش برشی بحرانی در کف برای حرکت ذره رسوب بر اساس دیاگرام شیلدز ، $\rho_w$ و $\rho_s$:جرم حجمی آب و رسوب ، $\upsilon$: ویسکوزیته آب، $g$: شتاب گرانش و $c_{bed}$: غلظت بار بستر می‌باشند. مقدار $a$: برابر با اندازه زبری یا نصف اندازه فرم بستر یا هر کدام که بزرگتر باشد. غلظت رسوب برای نزدیک ترین سلول به بستر از رابطه Rouse (1973) میان‌یابی یا برون یابی می‌شود:

$$\frac{c_z}{c_{bed}} = \left(\frac{h-z}{z}\frac{a}{h-a}\right)^z \qquad (۷)$$

که در آن $h$:عمق آب ، $z$: فاصله از کف تا مرکز سلول کف و $c_z$: غلظت رسوب در فاصله $z$ از کف می‌باشد.

برای تعیین بار بستر نیز از رابطه وان راین استفاده می‌شود :

$$\frac{q_b}{d^{1.5}\sqrt{\frac{(\rho_s-\rho_w)g}{\rho_w}}} = 0.053\frac{\left[\frac{\tau-\tau_c}{\tau_c}\right]^{1.5}}{d^{0.3}\left[\left(\frac{(\rho_s-\rho_w)g}{\rho_w\upsilon^2}\right)\right]^{0.1}} \qquad (۸)$$

که در آن $q_b$: بار بستر و سایر پارامترها قبلاً در رابطه (۶) معرفی شده‌اند.

تغییرات کف بر اساس معادله پیوستگی رسوب برای نزدیکترین سلول‌ها در کف که به آن‌ها سلول‌های کف گفته می‌شود محاسبه می‌شود. کمبود کلی پیوستگی رسوب در سلول کف جمع این تغییرات می‌باشد: تغییرات غلظت در طول زمان ، انتقال بار معلق ، سرعت سقوط ذره، انتشار بار معلق و تغییر بار بستر.

کمبود کلی معادله پیوستگی رسوب وقتی که بار بستر اضافه شود بر اساس معادله زیر به‌دست می‌آید :

$$U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + \rho_s w \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial q_{b,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{b,y}}{\partial y} = \rho_s \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma \frac{\partial c}{\partial x_j}) + \frac{\partial m}{\partial x_j} \qquad (۹)$$

رسوب‌گذاری بار بستر در دو جهت $x$ و $y$ اتفاق می‌افتد. برای بدست آوردن $m$، معادله (۹) بر روی همه سلول‌های کف و با استفاده از روش حجم کنترل انتگرال گرفته می‌شود. موقع حل معادله مذکور مقدار $m$ نامشخص است و سرعت‌ها قبلاً بر اساس معادله سنت ونانت و معادله آشفتگی $K-\varepsilon$ به‌دست آمده است. غلظت در سلول‌های کف بر اساس معادله (۶) ، برای بقیه سلول‌ها بر اساس معادله (۷) محاسبه می شود. بار بستر طبق رابطه (۸) به‌دست می‌آید. مقدار $m$ بر چگالی رسوبات بستر تقسیم شده تا حجم رسوبگذاری در هر گام زمانی به‌دست آید.

**شرایط مرزی رسوب**

غلظت رسوب در حالت تعادل از رابطه (۶) برای نزدیکترین سلول به کف به عنوان شرط مرزی کف در نظر گرفته می‌شود.

دیگر شرط مرزی برای غلظت رسوب عبارتند از مقدار معلوم غلظت برای مزر بالادست و شرط گرادیان صفر برای سطح جریان، خروجی و دیوارهای کناری. در این تحقیق که تنها شبیه سازی فرسایش و رسوبگذاری موضعی در محل تلاقی مورد توجه است هیچ گونه تزریق رسوب لحاظ نشده است.

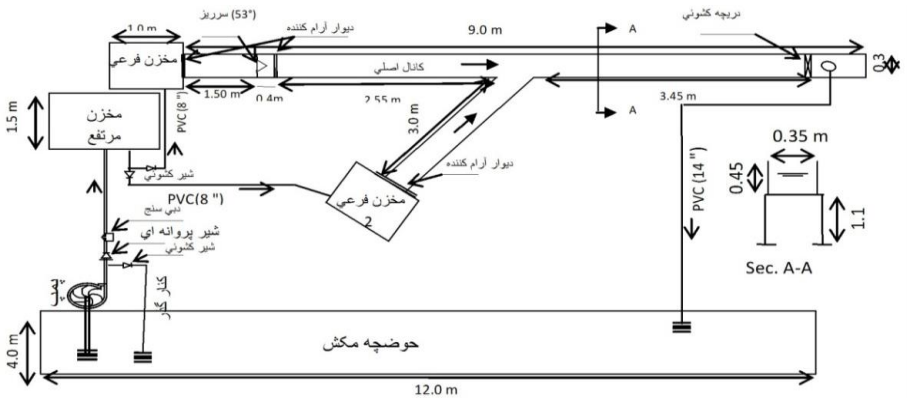
## مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق از داده‌های مدل آزمایشگاهی Ghobadian (2006) استفاده شد. در مدل آزمایشگاهی مذکور، فلوم اصلی به طول ۹ متر و عرض ۰/۳۵ متر می‌باشد. در ۲ متر اول ارتفاع مفید فلوم اصلی ۰/۷۵ متر و در بقیه طول آن ۰/۴۵ متر می‌باشد. کانال فرعی دارای طول ۳ متر ، پهنای ۰/۲۵ متر و ارتفاع مفید ۰/۴۵ متر می‌باشد. هر دو فلوم بدون شیب و افقی هستند. در انتهای بالا دست هر دو فلوم مخزن‌های آرام کننده به منظور کاهش انرژی جنبشی جریان ورودی نصب شده است. یک مخزن مرتفع دبی ثابت مورد نیاز برای هر دو فلوم را تامین می‌کند. دبی ورودی کل سیستم توسط یک دستگاه سرعت سنج با دقت۰/۰۱ ± لیتر بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. دبی ورودی به کانال اصلی نیز با استفاده از سرریز مثلثی نصب شده در ابتدای آن اندازه‌گیری می‌شود. در انتهای کانال اصلی از یک دریچه کشویی به منظور تنظیم رقوم سطح آب پایاب استفاده می‌شود. کانال فرعی با زاویه ۶۰ درجه به کانال اصلی متصل شده است. مقادیر سرعت جریان بصورت دوبعدی در محدوده تلاقی در یک شبکه دو سانتی‌متری در دو سانتی‌متری در اعماق مختلف از کف تا سطح جریان به فواصل ۱/۵ سانتی‌متری با دستگاه لیزری داپلر اندازه‌گیری شده است. شکل ۴ نمایی از فلوم آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

در شبیه‌سازی عددی کانال اصلی بعد از دیوار آرام‌کننده جریان در نظر گرفته شد. بدین ترتیب طول کانال اصلی و فرعی به ترتیب ۶/۲۸۸۶ و ۳ متر می‌باشد. کانال فرعی در ۲/۵۵ متری از بالادست کانال اصلی به آن وصل می‌شود. سیستم مختصات نیز به این صورت است: جهت مثبت x به طرف پایین‌دست کانال اصلی، جهت مثبت y در جهت کانال فرعی و جهت مثبت z به سمت بالا مختصات گوشه پایین دست اتصال برابر ۲/۸۳۷ =x و ۲/۵۹۸=y می‌باشد.) اطلاعات کامل مدل آزمایشگاهی در جدول (۱) آمده است.

**جدول ۱- اطلاعات مدل آزمایشگاهی**

| شرایط آزمایشگاهی | دبی کانال اصلی (L/s) | دبی کانال فرعی (L/s) | نسبت دبی | عمق پایاب (cm) | عرض کانال اصلی (cm) | عرض کانال فرعی(cm) | قطر متوسط ذره رسوب (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| جریان | ۸/۸۳ | ۱۶/۶۷ | ۰/۶۶ | ۲۰ | ۳۵ | ۲۵ | – |
| رسوب | ۱۰ | ۱۰ | ۰/۵ | ۱۲/۷۶ | ۳۵ | ۲۵ | ۱/۹۵ |




**شکل ٤- مشخصات فلوم آزمایشگاهی Ghobadian (2006)**

## نتایج و بحث

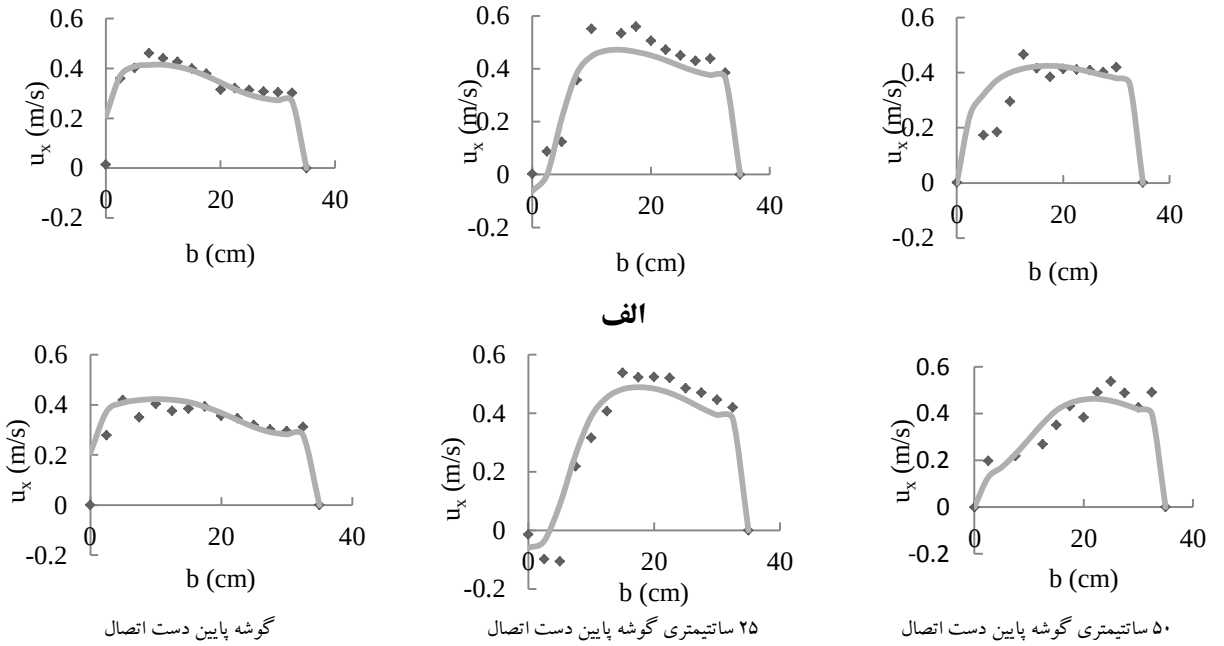
### صحت سنجی جریان

قبل از شبیه سازی رسوب، توانایی مدل برای شبیه سازی جریان با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی Ghobadian (2006) برای زاویه ۶۰ درجه ارزیابی شد.

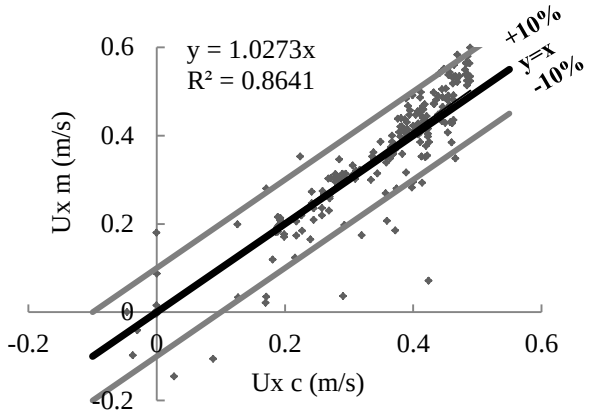
مطالعات قبلی نشان داده است که اندازه شبکه تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی نتایج خروجی از مدل دارد. شبکه مطلوب شبکه‌ای است که مقادیر خروجی از مدل وابسته به اندازه شبکه نباشد و تا حد امکان فضا و زمان کمتری از کامپیوتر را به خود اختصاص دهد. بر اساس دستورالعمل ارائه شده توسط Biron، Ramamurthy و Han (2004) بزرگترین اندازه شبکه‌ای که برای آن مقادیر حداکثر و حداقل سرعت، فشار و انرژی جنبشی اختلاط در محدوده ۱۰ درصد پارامترهای به‌دست آمده از حل شبکه ریز قرار داشته باشند، شبکه مطلوب می‌باشد. در این تحقیق نهایتا شبکه‌بندی (۱۲ × ۸۱ × ۱۳۱) به ترتیب در امتداد x، y و z به عنوان شبکه بهینه انتخاب شد(شکل ۳). علاوه بر این ارتفاع سلولها در جهت قائم متغیر در نظر گرفته شد. سلول‌های با ارتفاع کوچکتر نزدیک بستر انتخاب شدند.

در شکل (۵) مقایسه پروفیل‌های عرضی سرعت طولی در فواصل مختلف از کف کانال اصلی و در مقاطع مشخصی در طول کانال اصلی نشان می‌دهد که مدل توانایی نسبتاً قابل‌قبولی در پیش‌بینی سرعت افقی دارد، هرچند که مدل اندازه ناحیه جداشدگی جریان (ناحیه‌ای با سرعت منفی) را تا حدودی کوچکتر از مقدار اندازه‌گیری نشان می‌دهد. این اختلاف می تواند ناشی از ضعف مدل $K-\varepsilon$ در شبیه‌سازی جریان در نواحی چرخشی باشد. Weerakoon، Kawahara و Tamia (1991) نیز اشاره کرده است که مدل $K-\varepsilon$ در نواحی چرخشی ضعف دارد و ابعاد ناحیه چرخشی را کمتر از مقدار واقعی حدس می‌زند.

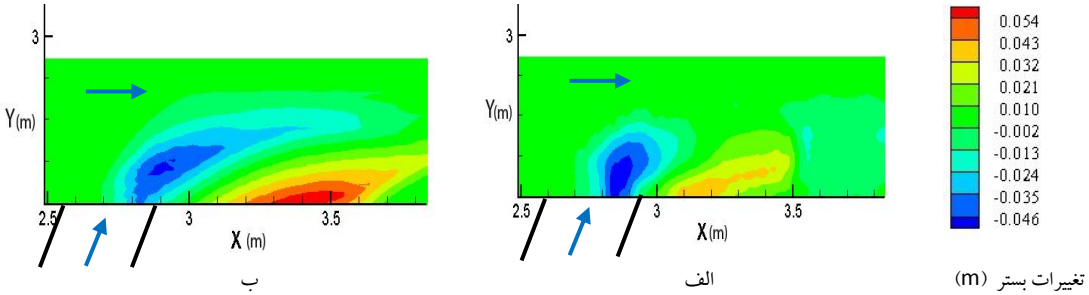
به منظور مقایسه کمی نتایج و بررسی دقت مدل در طی مرحله صحت‌سنجی مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر سرعت‌های محاسبه شده در نقاط مختلف محدوده تلاقی در شکل (۶) نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون به ترتیب برابر ۰/۸۶۴ و ۱/۰۲۷ به‌دست آمده است که نشان می‌دهد که مدل با دقت مناسبی توانایی شبیه‌سازی سرعت‌های اصلی جریان در محل تلاقی را دارد. جذر میانگین مربعات خطا نیز که مقدار آن برابر ۰/۰۶۱ برآورد شده است نیز همین مطلب را به اثبات می‌رساند. همانطور که از شکل (۶) مشخص است، بیشتر نقاط در محدود ۹۰٪ دقت قرار دارند. نقاط خارج از باند ۱۰٪ خطا نقاطی هستند که در ناحیه جداشدگی قرار دارند که به دلیل خطای مدل $K-\varepsilon$ و وجود جریان‌های چرخشی بیشترین خطا در این نقاط قابل مشاهده است.




**شکل ۵- مقایسه پروفیل‌های عرضی سرعت طولی در مقاطع مختلف کانال اصلی الف )۱/۵ سانتیمتری از کف ب) ۲۰ سانتیمتری از کف (نقاط توپر اندازه‌گیری، خط ممتد محاسباتی با مدل)**



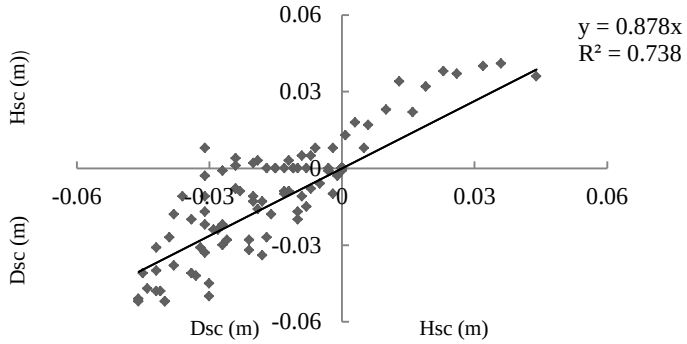

**شکل٦- مقایسه سرعت‌های طولی پیش بینی شده با اندازه‌گیری شده**



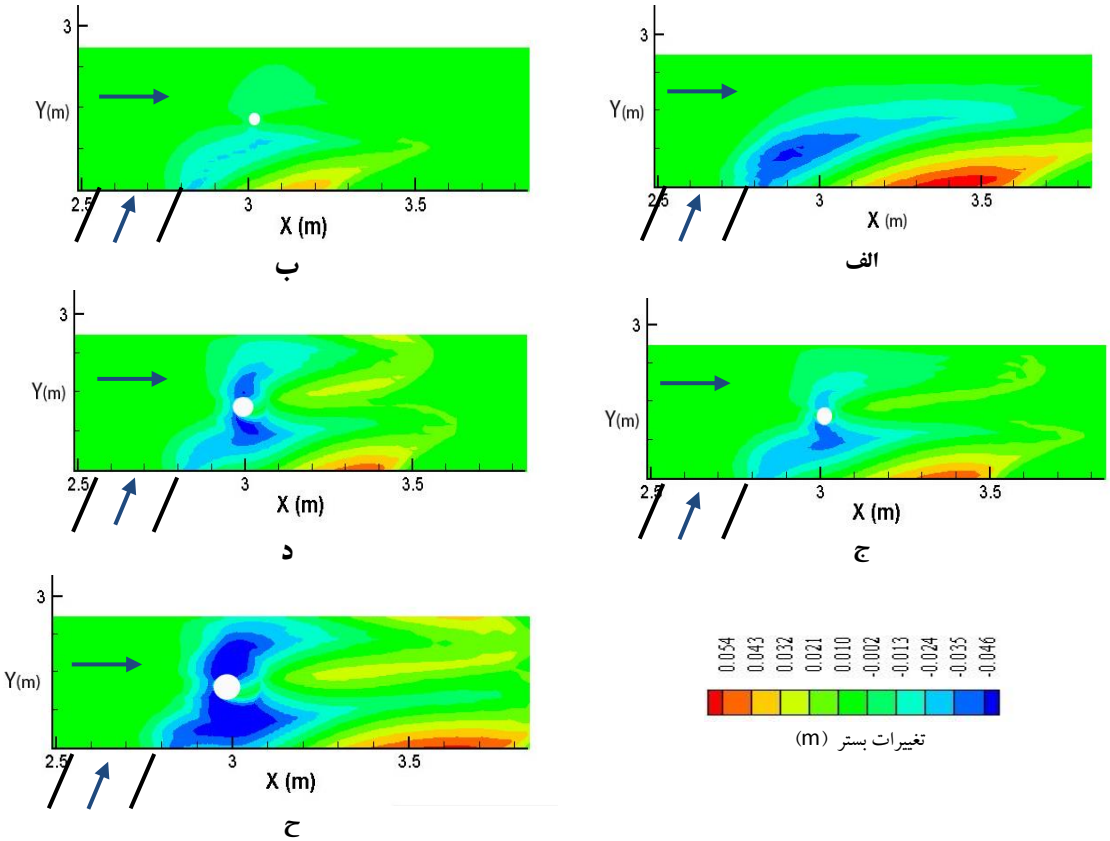

**شکل ۷- مقایسه نتایج شبیه سازی رسوب الف) مدل آزمایشگاهی ب) شبیه سازی توسط مدل**

بعد از اطمینان از توانایی مدل در شبیه سازی جریان در تلاقی ۶۰ درجه، شبیه‌سازی رسوب برای تلاقی مذکور انجام شد. واسنجی مدل برای شرایط رسوب نشان داد بهترین نتیجه زمانی حاصل شد که پارامتر شیلدز بحرانی ۰/۰۴ و زبری بستر دو برابر اندازه متوسط رسوب بستر باشد($k_s=2d_{50}$). نتایج نشان داد بلافاصله بعد از شروع شبیه‌سازی در محل اتصال عمل فرسایش با سرعت بالایی اتفاق می‌افتد. این عمل فرسایشی که در زمان اولیه از سرعت‌بالایی برخوردار است، با گذشت زمان سرعت کاهشی به خود می‌گیرد تا به یک حالت تعادل برسد. نظر به اینکه بعد از مدت ۸۵۰ دقیقه الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری به حالت تعادل رسیده است، بنابراین نتایج مدل در این زمان برای مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده انتخاب شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی رسوب توسط مدل با داده‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی نشان داد که مدل توانایی تقریبا قابل قبولی در پیش بینی حداکثر عمق چاله فرسایشی و توانایی نسبتاً خوبی در پیش بینی ارتفاع نهایی رسوبگذاری دارد. شکل (۷) الگوی کلی فرسایش و رسوب‌گذاری در محدوده تلاقی در کانال اصلی را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود هم در مدل عددی و هم داده‌های اندازه‌گیری یک ناحیه فرسایش در نزدیک محل ورود جریان فرعی به اصلی و یک ناحیه رسوب‌گذاری در محدوده ناحیه چرخشی جریان در پایین‌دست گوشه اتصال را نشان می‌دهند. حداکثر عمق فرسایش اندازه‌گیری شده (۵/۲- سانتی‌متر) با مقدار محاسبه شده توسط مدل (۴/۷- سانتی‌متر) کمتر از ۱۰ درصد خطا دارد. از نظر کلی مقداری اختلاف بین مقادیر حداکثر ارتفاع رسوبگذاری اندازه‌گیری شده و مقدار محاسبه شده توسط مدل وجود دارد. علت این اختلاف می‌تواند ناشی از ضعف رابطه Van Rijn (1984) در برآورد حمل رسوب و خطای اندازه‌گیری باشد. لازم به ذکر است که نرم افزار SSIIM1 در حال حاضر تنها از رابطه مذکور برای انتقال بار بستر استفاده می‌کند.

همچنین به منظور مقایسه کمی و بررسی دقت مدل در شبیه‌سازی فرسایش و رسوب، تغییرات بستر اندازه‌گیری شده در مقابل محاسبه شده در نقاط مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون به ترتیب برابر ۰/۷۳۸ و ۰/۸۷۸ بدست آمده است که نشان می‌دهد که مدل با دقت نسبتاً مناسبی توانایی شبیه‌سازی تغییرات بستر در محل تلاقی را دارد. لازم به ذکر است که در شکل (۸) عمق فرسایش و ارتفاع رسوبگذاری به ترتیب با $D_{sc}$ و $H_{sc}$ تعریف شده است.




**شکل ۸- تغییرات بستر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده**




**شکل ۹- تأثیر پایه پل بر آبشستگی موضعی : الف) حالت بدون پایه پل ب) r/w=۰/۰۵ ج) r/w=۰/۱ د) r/w=۰/۱۵ ح) r/w=۰/۲**

**تأثیر پایه پل بر آبشستگی**

پس از صحت‌سنجی مدل، با قرار دادن پایه پل با شعاع‌های نسبی مختلف به بررسی تأثیر پایه پل بر آبشستگی موضعی که هدف اصلی این تحقیق بود، پرداخته شد. بدین منظور پایه پل با شعاع‌های نسبی (r/w؛ r=شعاع پایه، w=عرض کانال اصلی) ۰/۰۵ ، ۰/۱ ، ۰/۱۵ و ۰/۲ در محدوده تلاقی قرار داده شد. همانگونه که در شکل (۹) نشان داده شده است، حداکثر عمق فرسایش برای حالت بدون پایه ۰/۰۴۷- متر برآورد شد، در حالی که برای حالت با پایه و برای شعاع‌های نسبی ۰/۰۵ ، ۰/۱ ، ۰/۱۵ و ۰/۲ به ترتیب ۰/۰۲۹- ، ۰/۰۴۴- ، ۰/۰۵۵- و ۰/۰۷۹- متر بدست آمد. نتایج نشان داد که وقتی پایه پل کوچک است (۰/۱ و r/w=۰/۰۵) به دلیل کاهش اختلاف سطح آب بالادست و پایین دست کانال اصلی نسبت به حالت بدون پایه، وجود پایه پل باعث کاهش عمق آبشستگی در محدوده تلاقی می‌گردد. به‌گونه‌ای که وجود پایه پل با شعاع های نسبی ۰/۰۵ و ۰/۱ به ترتیب ۳۸ و ۶ درصد مقدار حداکثر عمق آبشستگی را نسبت به حالت بدون پایه

کاهش می‌دهد. در حالی که وقتی شعاع پایه پل بزرگ است (۰/۱۵ و r/w=۰/۲) کاهش عرض موثر عبور جریان باعث تشدید آبشستگی در محدوده تلاقی و اطراف پایه می‌گردد. این افزایش برای شعاع های نسبی ۰/۱۵ و ۰/۲ به ترتیب ۱۷ و ۶۸ درصد بدست آمد. با قرارگیری پایه پل در محدوده تلاقی برای شعاع نسبی r/w=۰/۱ دو تپه رسوب‌گذاری یکی در ساحل راست و دیگری در نزدیکی محور مرکزی کانال اصلی مشاهده شد. برای شعاع‌های نسبی (۰/۱۵ و r/w=۰/۲) سه تپه رسوب‌گذاری به ترتیب در ساحل راست، محور مرکزی و ساحل چپ کانال اصلی مشاهده شد. با افزایش شعاع نسبی پایه پل حجم رسوب‌گذاری نیز افزایش یافته است. وجود پایه پل در محدوده چاله فرسایشی باعث گسترش آن و متمایل شدنش به سمت ساحل چپ کانال اصلی شده است. همانطور که از شکل (۹) نیز مشخص می‌باشد در حالت بدون پایه پل تغییرات بستر در ساحل چپ کانال اصلی صفر است ولی با قرار گیری پایه پل و با افزایش شعاع نسبی پایه پل تغییرات کف در نزدیکی ساحل چپ بیشتر شده است.

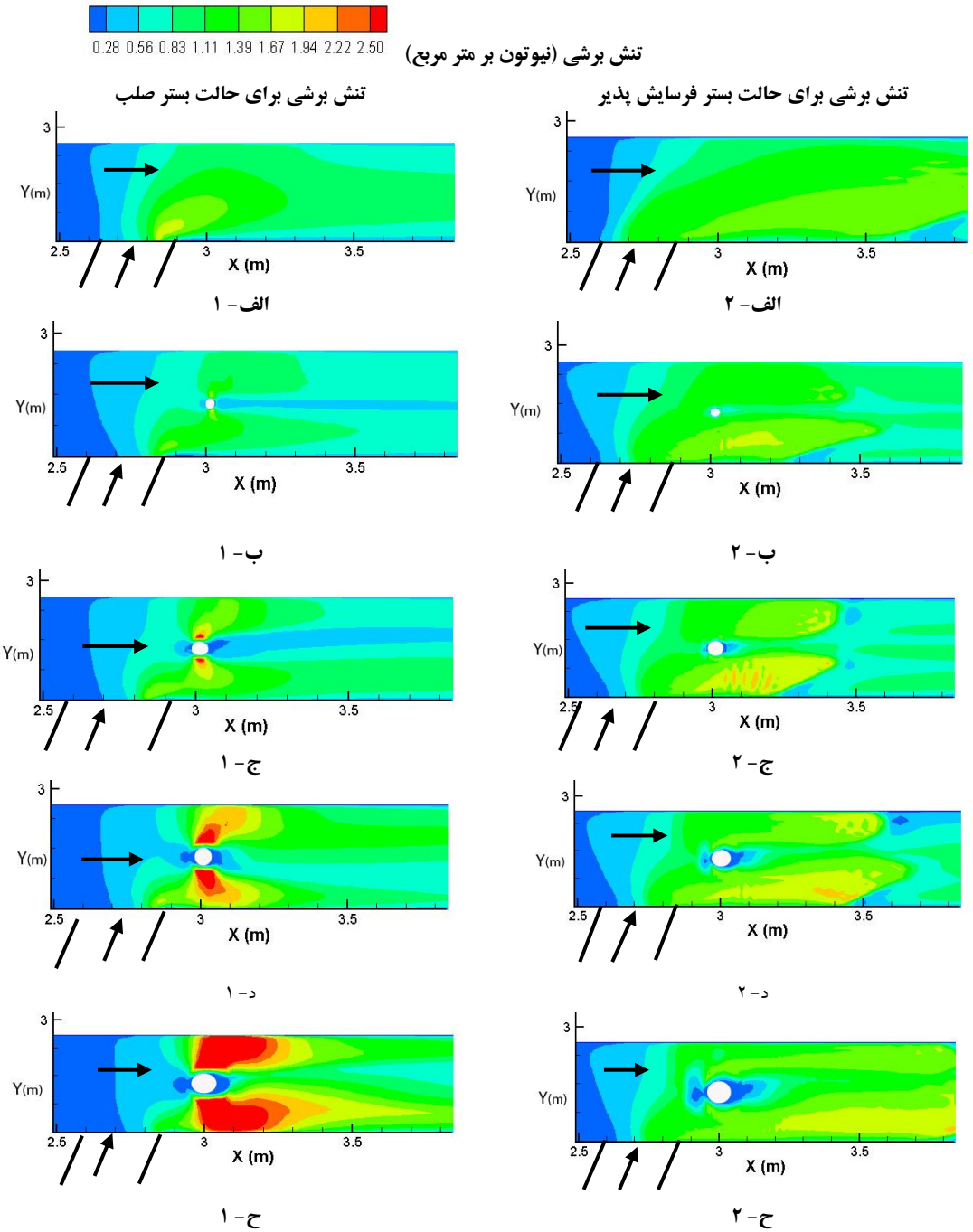
توجیه این مسئله به کمک بررسی الگوی تنش برشی بستر کانال امکان پذیر است. در شکل (۱۱) الگوهای تنش برشی کف برای حالت بستر صلب ( حالت ۱) و برای حالت بستر فرسایش پذیر ( حالت ۲) پس از به تعادل رسیدن بستر ارایه شده‌است. مقایسه شکل (الف- ۱ ) با سایر اشکال حالت ۱ نشان می دهد با قرار گیری پایه پل در محدوده تلاقی الگوی تنش برشی بستر نسبت به حالت بدون پایه کاملا تغییر کرده است. وقتی پایه پل کوچک است (۰/۱ و r/w=۰/۰۵) همان‌گونه که در شکل‌های ( ب- ۱و ج- ۱) نشان داده شده است وجود پایه پل باعث کاهش گستره ناحیه حداکثر تنش برشی شده است. در شعاع نسبی r/w=۰/۱ حداکثر تنش برشی کمی از حالت بدون پایه بیشتر است، با این وجود به دلیل اینکه محدوده تأثیر آن کوچک بوده، نتوانسته مقدار حداکثر عمق فرسایش را در مقایسه با حالت بدون پایه پل افزایش دهد. از طرفی شکل‌های ( د-۱ و ح- ۱) نشان می‌دهند با افزایش اندازه پایه پل (۰/۲ و r/w=۰/۱۵) از یک طرف کاهش عرض موثر جریان و از طرف دیگر گسترش محدوده حداکثر تنش برشی باعث شده که مقدار تنش برشی بستر و به دنبال آن آبشستگی موضعی افزایش یابد. به عبارتی الگوی تنش برشی در شرایط وجود پایه در محل تلاقی، از الگوی متعارف تنش برشی در تلاقی رودخانه‌ها و کانال‌های روباز بدون پایه پل به سمت الگوی متعارف تنش برشی در اطراف پایه پل در کانال‌های مستقیم تمایل پیدا می‌کند. هرچند که وجود جریان جانبی از کانال فرعی باعث شده است که تقارن تنش برشی در اطراف پایه پل مقداری به هم ریخته شود.

همچنین مقایسه شکل‌ها در حالت ۱ با حالت ۲ نشان می‌دهد تغییرات تنش برشی بستر برای شعاع‌های نسبی مختلف در حالت ۱ ( بستر صلب ) بیشتر از حالت۲ ( بستر فرسایش پذیر) است. به عبارتی تغییرات بستر باعث کاهش تنش برشی کف شده است، ولی دنباله‌های اطراف پایه پل در این حالت گسترش یافته است. همچنین عدم تقارن دنباله‌ها در حالت ۱ متمایزتر می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که وجود جریان فرعی که باعث این عدم تقارن شده است در حالت بستر صلب ملموس‌تر است. هم‌چنین در این حالت حداکثر تنش برشی در دو طرف پایه قابل مشاهده است ولی در حالت بستر فرسایش پذیر محدوده حداکثر تنش برشی بین پایه و ساحل راست کانال اصلی مشاهده شد.

نکته قابل توجهی که برای نمونه از مقایسه شکل‌های( ۹- ح و ۱۰- ح-۱ ) به‌دست می‌آید، این است که از روی الگوی تنش برشی در حالت بستر صلب می توان به الگوی تقریبی فرسایش و رسوب گذاری در بستر های فرسایش پذیر پی برد. شکل (۱۰- ح-۱ ) نشان می‌دهد محدوده تنش برشی حداکثر بین پایه پل و ساحل راست کانال اصلی می‌باشد و شکل (۹-ح) نشان داده است که در این محدوده بیشترین مقدار فرسایش رخ می‌دهد.

در جدول (۲) مختصات محل حداکثر فرسایش و رسوبگذاری برای حالت بدون پایه و پایه با شعاع‌های نسبی مختلف ارایه شده است. مقایسه مختصات محل حداکثر رسوبگذاری نشان می‌دهد که با قرار گرفتن پایه پل در محدوده تلاقی، تپه رسوبگذاری ابتدا به سمت بالادست کانال اصلی حرکت کرده و سپس با افزایش شعاع نسبی پایه و افزایش حجم رسوبگذاری به سمت پایین دست جابجا شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند تپه رسوب‌گذاری حرکت عرضی نداشته است. مقایسه مختصات حداکثر فرسایش نیز نشان می‌دهد که با قرارگیری پایه پل، محل حداکثر فرسایش به سمت پایه پل، متمایل شده است. حرکت عرضی بارزی نیز برای چاله فرسایشی به ازای شعاع‌های نسبی مختلف مشاهده نشد.

هم‌چنین مقادیر حداکثر فرسایش و رسوبگذاری برای حالت بدون پایه و پایه با شعاع‌های نسبی مختلف در جدول (۳) آمده است. همان‌طور که قبلا هم اشاره شد برای پایه پل کوچک (۰/۱ و r/w=۰/۰۵) آبشستگی و رسوبگذاری نسبت به حالت بدون پایه کاهش یافته است ولی وقتی که پایه پل بزرگ است (۰/۲ و r/w=۰/۱۵) آبشستگی و رسوب‌گذاری افزایش یافته است. در این حالت با اینکه ارتفاع تپه رسوبگذاری اندکی کاهش داشته است ولی با توجه به شکل (۹) حجم رسوبگذاری افزایش یافته است.




**شکل ۱۰- تأثیر پایه پل بر تنش برشی بستر الف) حالت بدون پایه پل ب) r/w=۰/۰۵ ج) r/w=۰/۱ د) r/w=۰/۱۵ ح) r/w=۰/۲**

**جدول ۲- مختصات حداکثر فرسایش و رسوب‌گذاری**

| مختصات | | بدون پایه | r/w=۰/۰۵ | r/w=۰/۱ | r/w=۰/۱۵ | r/w=۰/۲ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| حداکثر فرسایش | x(m) | ۲/۸۸ | ۲/۹۹ | ۳/۰۰ | ۳/۰۰ | ۲/۹۹ |
| | y(m) | ۲/۶۸ | ۲/۷۱ | ۲/۷۳ | ۲/۷۲ | ۲/۷۲ |
| حداکثر رسوبگذاری | x(m) | ۳/۴۲ | ۳/۱۸ | ۳/۳۰ | ۳/۳۱ | ۳/۵۱ |
| | y(m) | ۲/۶۱ | ۲/۶۱ | ۲/۶۰ | ۲/۵۹ | ۲/۵۹ |

**جدول ۳- مقادیر حداکثر فرسایش و رسوب‌گذاری**

| | بدون پایه | r/w=۰/۰۵ | r/w=۰/۱ | r/w=۰/۱۵ | r/w=۰/۲ |
|---|---|---|---|---|---|
| حداکثر مقدار رسوب‌گذاری(m) | ۰/۰۶ | ۰/۰۳۹ | ۰/۰۵۱ | ۰/۰۵۱ | ۰/۰۵۷ |
| حداکثر مقدار فرسایش (m) | -۰/۰۴۷ | -۰/۰۲۹ | -۰/۰۴۴ | -۰/۰۵۵ | -۰/۰۷۹ |

**جدول ٤- معادلات حاکم بر آبشستگی**

| نام محقق و سال | معادله حاکم بر آبشستگی موضعی |
|---|---|
| Laursen و Touch (1956) | $\frac{d_s}{b}=1.5(\frac{y}{b})^{0.3}$ |
| Liu، Chang و Skinner (1961) | $\frac{d_s}{y}=2.0(\frac{b}{y})^{\frac{2}{5}}(Fr)^{\frac{2}{3}}$ |
| (1962) Laursen | $\frac{d_s}{y}=5.5\frac{d_s}{y}(\frac{d_s}{11.5y}+1)^{1.7}-1$ |
| (1975) Richardson et al. | $\frac{d_s}{y}=2.0(\frac{b}{y})^{0.65}(Fr)^{0.43}$ |
| (1988) Froehlich | $\frac{d_s}{b}=0.32\varphi(\frac{b'}{b})^{0.62}(\frac{y}{b})^{0.46}(Fr)^{0.2}(\frac{b}{D_{50}})^{0.08}$ |

مقایسه مقادیر برآورد شده برای آبشستگی پایه با معادلات تجربی حاکم بر آبشستگی( جدول ۴) نشان داد که اختلاف بارزی بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر بدست آمده توسط روابط تجربی وجود دارد. این تفاوت به دلیل وجود جریان کانال فرعی می‌باشد که باعث تغییر الگوی جریان متداول اطراف پایه پل می‌شود. کمترین اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و بدست آمده توسط رابطه Froehlich (1988) به‌دست آمد. نتایج مربوط به این مقایسه در جدول (۵) آمده است.

لازم به ذکر است در روابط ارایه شده در جدول (۴) $d_s$ عمق آبشستگی (m)، $b$عرض پایه پل (m)، $y$عمق جریان در بالادست پایه(m)، $Fr$عدد فرود در بالادست پایه، $D_{50}$ قطر متوسط ذرات بستر، $\varphi$ ضریبی است که تاثیر شکل پایه را در نظر می‌گیرد و $b'$تأثیر طول پایه و هجوم آب به پایه را در نظر می‌گیرد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$b'=b\cos\alpha+L\sin\alpha \qquad (۱۰)$$

که در آن $L$ طول پایه (m) و $\alpha$ زاویه محور پایه نسبت به جریان بر حسب درجه می‌باشد.

نتایج Park، Jang و Choi (2014) که در جدول (۶) ارایه شده است نشان داد که رابطه Laursen و Touch (1956) مقادیر آبشستگی پایه پل قرار گرفته در محدوده حداکثر سرعت و در مقاطع گوشه پایین‌دست اتصال، نیم و یک برابر پهنای کانال پایین تر از گوشه پایین‌دست اتصال را به ترتیب ۱۱/۷، ۱۸/۲ و ۵۹/۸ برابر مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل Mike3 برآورد می‌کند. ولی با استفاده از همین رابطه و بر اساس نتایج پیش‌بینی شده توسط SSIIM1 در این تحقیق مقادیر آبشستگی برای شعاع‌های نسبی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ در محدوده حداکثر سرعت و در مقطع نیم برابر پهنای کانال اصلی پایین تر از گوشه پایین‌دست اتصال به ترتیب ۲/۷، ۲/۹، ۳/۱ و ۰/۲۶ برابر مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل به‌دست آمد. در کل مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده با روابط تجربی نشان می‌دهد که به دلیل در نظر نگرفتن جریان شاخه فرعی اختلاف زیادی بین مقادیر پیش‌بینی شده و بدست آمده توسط روابط تجربی وجود دارد و این امر لزوم انجام آزمایشهای گسترده در این زمینه و استخراج روابط تجربی برای بدست آوردن عمق آبشستگی اطراف پایه پل در محدوده تلاقی را ایجاب می‌کند.

**جدول ۵- مقایسه آبشستگی پایه پل با روابط تجربی**

| شعاع نسبی پایه | شبیه سازی(m) | فرمول تجربی (m) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | SSIIM1 | Laursen و Touch (1956) | Liu، Chang و Skinner (1961) | Laursen (1962) | Richardson et al. (1975) | Froehlich (1988) |
| r/w=۰/۰۵ | ۰/۰۲۹ | ۰/۰۷۸ | ۰/۰۲۱ | ۰/۰۲۸ | ۰/۰۷۳ | ۰/۰۲۱ |
| r/w=۰/۱ | ۰/۰۴۴ | ۰/۱۲۷ | ۰/۰۵۵ | ۰/۰۲۸ | ۰/۱۱۴ | ۰/۰۳۳ |
| r/w=۰/۱۵ | ۰/۰۵۵ | ۰/۱۷ | ۰/۰۹۶ | ۰/۰۲۹ | ۰/۱۱۵ | ۰/۰۴۲ |
| r/w=۰/۲ | ۰/۰۷۹ | ۰/۲۰۹ | ۰/۱۳۹ | ۰/۰۳ | ۰/۱۷۹ | ۰/۰۵۱ |

**جدول ٦-نتایج آبشستگی پایه پل Park، Jang و Choi (2014)**

| محدوده قرارگیری پایه | شبیه سازی(m) | فرمول تجربی (m) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Mike3 | Laursen و Touch (1956) | Laursen (1962) | Richardson et al. (1975) | Froehlich (1988) |
| ناحیه حداکثر سرعت- گوشه پایین دست اتصال | ۰/۲۶۷ | ۳/۱۳۹ | ۱/۷۳۰ | ۲/۶۰۳ | ۳/۲۷۴ |
| ناحیه حداکثر سرعت، نیم برابر پهنای کانال پایین تر از گوشه پایین‌دست اتصال | ۰/۱۷۱ | ۳/۱۱۹ | ۱/۷۱۱ | ۲/۶۸۲ | ۳/۲۸۴ |
| ناحیه حداکثر سرعت، یک برابر پهنای کانال پایین تر از گوشه پایین‌دست اتصال | ۰/۰۵۲ | ۳/۱۱۳ | ۱/۷۰۵ | ۲/۸۱۶ | ۳/۳۱۱ |
| ناحیه رکود سرعت- گوشه پایین دست اتصال | ۰/۳۴۲ | ۳/۱۲۹ | ۱/۷۲۱ | ۲/۷۷۵ | ۳/۳۰۹ |
| ناحیه رکود، نیم برابر پهنای کانال پایین تر از گوشه پایین‌دست اتصال | ۰/۰۶۵ | ۳/۱۰۰ | ۱/۶۹۴ | ۲/۰۵۲ | ۳/۱۲۷ |
| ناحیه رکود، یک برابر پهنای کانال پایین تر از گوشه پایین‌دست اتصال | ۰/۰۷۲ | ۳/۱۰۳ | ۱/۶۹۶ | ۲/۲۹۰ | ۳/۱۸۷ |

## نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا مدل سه بعدی SSIIM1 برای شبیه سازی الگو های جریان و رسوبگذاری در یک تلاقی ۶۰ درجه صحت سنجی شد. سپس به بررسی تأثیر پایه پل دایره‌ای با شعاع‌های نسبی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ بر آبشستگی موضعی و خصوصیات جریان از قبیل پروفیل طولی سطح آب و توزیع تنش برشی در محل تلاقی پرداخته شد. نتایج نشان داد:

۱- برای پایه پل کوچک با شعاع‌های نسبی (۰/۱ و r/w=۰/۰۵) به دلیل کاهش اختلاف سطح آب بالادست و پایین دست کانال اصلی نسبت به حالت بدون پایه، وجود پایه پل باعث کاهش عمق آبشستگی در محدوده تلاقی می‌گردد. به‌گونه‌ای که وجود پایه پل با شعاع‌های نسبی ۰/۰۵ و ۰/۱ به ترتیب ۳۸ و ۶ درصد مقدار حداکثر عمق آبشستگی را نسبت به حالت بدون پایه کاهش می‌دهد. در حالی که وقتی شعاع پایه پل بزرگ است، (۰/۱۵ و r/w=۰/۲) کاهش عرض موثر عبور جریان باعث تشدید آبشستگی در محدوده تلاقی و اطراف پایه می‌گردد. این افزایش برای شعاع‌های نسبی ۰/۱۵ و ۰/۲ به ترتیب ۱۷ و ۶۸ درصد به‌دست آمد.

۲- با قرارگیری پایه پل در محدوده تلاقی الگوی تنش برشی بستر نسبت به حالت بدون پایه کاملا تغییر کرده است. وقتی پایه پل کوچک است (۰/۱ و r/w=۰/۰۵)، وجود پایه پل باعث کاهش گستره ناحیه حداکثر تنش برشی در مقایسه با حالت بدون پایه پل شده است. از طرفی با افزایش اندازه پایه پل (۰/۲ و r/w=۰/۱۵) بدلیل کاهش عرض موثر جریان مقدار تنش برشی بستر افزایش می‌یابد. دراین حالت تنش برشی در محل تلاقی، از الگوی متعارف تنش برشی در تلاقی کانال‌های روباز بدون پایه پل به سمت الگوی متعارف تنش برشی در اطراف پایه پل در کانال‌های مستقیم تمایل پیدا می‌کند. هرچند که وجود جریان جانبی از کانال فرعی باعث شده است که تقارن تنش برشی در اطراف پایه پل مقداری به هم ریخته شود.

## منابع

1- Biron, P.M., Ramamurthy, A.S. and Han, S., 2004. Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(3), pp. 243-253.

2- Dey, S., Raikar, R.V. and Roy, A., 2008. Scour at submerged cylindrical obstacles under steady flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, *134*(1), pp.105-109.

3- Esmaeili, T., Kharaghnis, S. and Dehghani, A., 2009. Three-dimensional numerical study of scouring around bridge pier under unsteady flow. *Journal of Water Sciences Research*, 1(1), pp.19-28 (In Persian).

4- Froehlich, D.C., 1988. Analysis of onsite measurements of scour at piers. In *Hydraulic engineering: proceedings of the 1988 national conference on hydraulic engineering*, pp. 534-539.

5- Ghobadian, R., 2007. Investigation of flow, scouring and sedimentation at river-channel confluences (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, Department of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran).

6- Ghobadian, R., Basiri, M. and Seydi Tabar, Z., 2014. The effect of circular bridge pier location on flow characteristics at 90 degree channel junction. *9th Symposium on Advances in Science & Technology*, Mashhad, Iran (In Persian).

7- Guemou, B., Seddini, A. and Ghenim, A., 2013. Numerical Investigations of the Bridge Pier Shape Influence on the Bed Shear Stress. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, *18*, pp.5685-5698.

8- Hassanzadeh, Y., Hakimzadeh, H. and Ayari, S., 2011. Study the effects of bridge pier shape on the flow pattern using the Fluent software. *Iran-Water Resources Research* 7(4), pp. 95-105 (In Persian).

9- Heron, K.M.M., 2007. Vortex shedding on bridge piers. Thesis of Bachelor of Science, University of Southern Queensland.

10- Homayoon, R., 2009. Effect of pier shape on scouring around bridge pier. *National Conference on of Water Crisis Management*, Marvdasht, Iran (In Persian).

11- Laursen, E.M. and Toch, A., 1956. *Scour around bridge piers and abutments* (Vol. 4). Ames, IA: Iowa Highway Research Board.

12- Laursen, E.M., 1962. Scour at bridge crossings. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, *127*(1), pp.166-179. Laursen, E.M. 1962. Scour at bridge crossings. Transation ASCE 127:166-180.

13- Liu, H.K., Chang, F.M. and Skinner, M.M., 1961. Effect of bridge constriction on scour and backwater. *Report No. CER60-HKL22*, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

14- Park, H., Jang, D. and Choi, G., 2014. A study on the flow characteristics influenced by hydraulic structure at a channel junction, *11th International Conference on Hydroinformatics*, New York City, USA.

15- Rouse, H., 1973. Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 102(1), pp. 463–543.

16- Richardson, E.V., Karaki, S., Mahmood, K., Simons, D.B. and Stevens, M.A., 1975. Highways in the River Environment, Hydraulic and Environmental Design Considerations.. *TRAINING AND DESIGN MANUAL* (No. FHWA-NHI-76-N005).

17- Richardson, E.V., 1975. Highways in the River Environment, Hydraulic and Environmental Design Considerations.

18- Salaheldin, T.M., Imran, J. and Chaudhry, M.H., 2004. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, *130*(2), pp.91-100.

19- Saneie, M. and Mohamadnejad, A.M., 2012. The effect of diameter of cylindrical pier on bridge pier scouring, *Retrofitting and Rehabilitation Ind*. 22, pp. 11-17 (In Persian).

20- Tabibzadeh, M., Dehghani, A., Khanjani, M.J. and Salehineyshabouri, A.A., 2005. Numerical simulation of scouring around circular bridge piers, *5th Iranian Hydraulic Conference*, Kerman, Iran (In Persian).

21- Rijn, L.C.V., 1984. Sediment transport, part II: suspended load transport. *Journal of hydraulic engineering*, *110*(11), pp.1613-1641..

22- Weerakoon, S.B., Kawahara, Y. and Tamai, N., 1991. Three-dimensional flow structure in channel confluences of rectangular section, paper presented at the 24th Congress of the IAHR. *Int. Assoc. for Hydraul. Res., Madrid, Spain*, pp. 373–380.

23- Yarnell, D.L., 1934. Bridge piers as channel obstructions (No. 442). *US Dept. of Agriculture*.

Shahid Chamran University of Ahvaz

**Irrigation Sciences and Engineering** **Vol. 41, No. 1, Spring 2018, p. 147-163**

**EXTENDED ABSTRACT**

# Investigating the Effect of Circular Bridge Piers on Local Scouring at 60° Channel Junctions Using SSIIM1 3D Numerical Model

R. Ghobadian[1*], M. Basiri[2] and Z. Seydi Tabar[3]

1*- Corresponding author, Associate professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah. *(rsghobadian@gmail.com).*

2- M.Sc. of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah.

3- M.Sc. of Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah.

Received:7 November 2015 Accepted:4 December 2016

**Keywords:** Local scouring, Bridge pier, Open channel junction, Relative radius, SSIIM1.

**Introduction:**

Insertion of different water structures such as bridge piers in the flow path contracts the flow cross section and causes backwater at upstream sections. The velocity and turbulence of flow increases around these structures and bed scouring will occur. To discover the effect of different structures in the vicinity of channel junctions on flow and sediment patterns, precise studies should be conducted. The effects of bridge pier on flow and sediment patterns in stright and curve open channels have been investigated (Salaheldin et al., 2004, Tabib zadeh et al., 2005). However, its effect on flow and sediment patterns at open channel confluences has rarely been studied.

**Methodology:**

The current study used a finite volume CFD model (SSIIM1) to compute flow and sediment pattern at a 60 degree channel confluence including a bridge pier. SSIIM1 program uses a structured grid and, solving Navier-Stokes and the standard $K-\varepsilon$ turbulence model at the same time, simulates the flow and sediment at a junction of channels. A computer program was prepared to provide the required mesh.

First, using the experimental data of Ghobadian (2006), the model was calibrated for flow and sediment cases in the absence of bridge pier. Then the effect of the circular bridge pier with the dimensionless radii of 0.05, 0.1, 0.15 and 0.2 (r/w, r=pier bridge radius, w= width of main channel) on scouring and sedimentation pattern at the confluence zone were studied. Table 1 shows the range of the relevant variables for flow and sediment cases.

**Table 1- Ghobadian's (2006) experimental data**

| *Data* | *Main channel flow(L/s)* | *Lateral channel flow(L/s)* | *Discharge ratio* | *Tail water depth (cm)* | *Main channel bed wide(cm)* | *Lateral channel bed wide(cm)* | *Grain size D50(mm)* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Flow* | 8.83 | 16.67 | 0.66 | 20 | 35 | 25 | - |
| *Sediment* | 10 | 10 | 0.5 | 12.76 | 35 | 25 | 1.95 |

**Findings**

Calibration of model for flow and sediment:

The calibration of SSIIM1 model for flow and sediment patterns at the 60 degree channel confluence in the absence of bridge pier showed that the model had a good accuary to predict longitudinal velocity and bed changes. The comparison of the measured and the simulated longitudinal velocities showed that the model predicted longitudinal velocity with 90% accuracy. The R square of the measured and calculated velocities was 0.8641. Moreover, the results of the calibration of model for sediment case showed that the model had a retively good accuracy to predict bed changes. The R square of the measured and calculated bed changes was obtained to be 0.738.

The effect of bridge pier on scouring and sedimentation pattern:

The results of the presence of bridge pier at the channel confluence with the dimensionless radii of 0.05, 0.1, 0.15 and 0.2 on scouring and sedimentation pattern indicated that when the bridge pier radius was small (r/w=0.05 and 0.1), the bridge pier reduced scouring at the channel junction because the difference between upstream and downstream water levels compared to the without-bridge case had decreased.. This reduction for relative radii of 0.05 and 0.1 were 38 and 6 percent, respectively. When the bridge pier radius was large (r/w=0.15 and 0.2), due to the reduction of effective width of the main channel, the bridge pier caused intensification of scouring at channel junction. This increase for relative radii of 0.15 and 0.2 were 17 and 68 percent, respectively.

Also, the compasion of the without-bridge case with the case of bridge pier with r/w=0.2 showed that the insertion of the bridge pier in the vicinity of scouring zone casued to expand and tend this zone to the left bank of the main channel. For this case, three sedimentation bars at the rigth bank, the centerline, and the left bank of the main channel were observed. Figure 1 shows the results of this analysis.

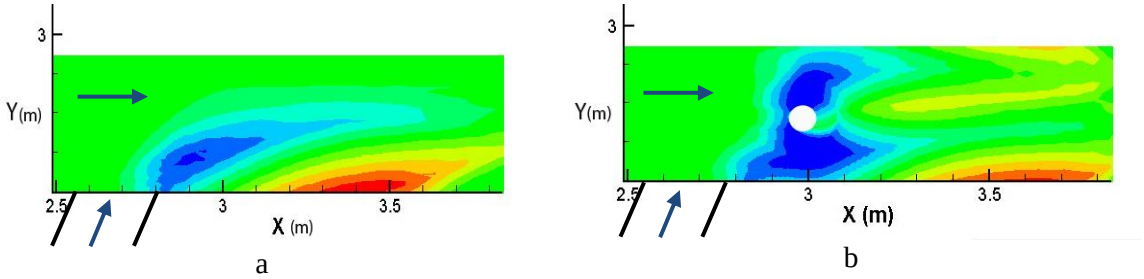



**Figure 1. Compasion of scouring and sedimentation patterns a)without bridge pier b)with bridge pier(r/w=0.2)**

The comparison of the predicted scouring depths with the results of emprical equations shows clear differences between them. This diffrence could be due to the discharge of tributary channel which changes the usuall pattern of sediment around the bridge piers. The calculated scouring depths with SSIIM1 model and a few emprical equations are shown in Table 2.

**Table 2- Comparsion of scouring depths**

| *dimensionless radius* | *Simulation (m)* | *Empirical Equations(m)* | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *SSIIM1* | *Laursen-*Toch (1956) | *Liu et al. (1961)* | *Laursen(1962)* | *CSU(1975)* | *Froehlich(1988)* |
| *r/w=0.05* | 0.029 | 0.078 | 0.021 | 0.028 | 0.073 | 0.021 |
| *r/w=0.1* | 0.044 | 0.127 | 0.055 | 0.028 | 0.114 | 0.033 |
| *r/w=0.15* | 0.055 | 0.17 | 0.096 | 0.029 | 0.115 | 0.042 |
| *r/w=0.2* | 0.079 | 0.209 | 0.139 | 0.03 | 0.179 | 0.051 |

**Conclusion**

Using the SSIIM1 model, the flow and sedimentation structures at 60 degree channel junction were simulated and the model was calibrated by experimental data. Then the effect of circular bridge pier with dimensionless radii of 0.05, 0.1, 0.15 and 0.2 (r/w, r=pier bridge radius, w= width of main channel) on scouring and sedimentation pattern at the confluence zone was investigated. The results showed a good agreement between the simulated velocity profiles given by the SSIIM1 model and the experimental measurements. Also, the ability of the model to predict the location and amount of scouring depth was very satisfying (error was less than 10%) but the height of sedimentation bar was higher than that of the experimental data.

Comparison of the two cases (with and without bridge pier case) showed that the position of maximum bed shear stress moved from near the separation zone to the sideways of the bridge pier. In other words, the bed shear stress and the sediment pattern in the presence of bridge pier changed from the common pattern of bed shear stress and sediment patterns at channel confluences to the pattern of bed shear stress and sediment around the bridge pier in straight channels.

**Refrences**

1- Froehlich, D.C. 1988. Analysis of onside measurements of scour at piers. *Hydraulic Engineering, Proceeding of the 1988 National Conference*.

2- Ghobadian, R. 2006 .Investigation of Flow, Scouring and Sedimentation at River- Channel Confluences. PhD thesis. Shahid chamran University Iran (In Persian).

3- Liu, M. K., Chang, F. M. and M. M. Skinner. 1961. Effect of bridge construction on scour and backwater. Report No. CER60-HKL22, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

4- Laursen, E.M. and A. Toch. 1956. Scour around bridge piers and abutments. Bulletin 4, Iowa high way research board, Iowa City.

5- Laursen, E.M. 1962. Scour at bridge crossings. Transation ASCE 127:166-180.

6- Richardson, E. V., Simons, D. B., Karaki, S., Mahmood, K., and M.A. Stevens. 1975. Highways in the RiverEnvironment. Dept. of Transportation, FHW A, Ft. Collins, Co.

7- Salaheldin. T.M., Irman. J. and M.H. Chaudhry. 2004. Numerical modeling of three dimensional flow field around circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(2), pp. 91-100.

8- Tabib zadeh, M. Dehghani, A. Khanjani, M.J. and Salehi Neyshabouri, A.A. 2005. Numerical simulation of scouring around circular bridge piers, *5th Iranian Hydraulic Conference*, Kerman, Iran (In Persian).