

## بررسی عددی اثر عرض شکاف بر الگوی جریان اطراف پایه پل

اکرم اسدی پرتو<sup>1</sup>، افشین اقبال زاده<sup>2\*</sup> و میترا جوان<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 91/11/28 تاریخ پذیرش: 92/03/08

<sup>1</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه رازی

<sup>2</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی

<sup>3</sup> پژوهشگر تحقیقات پیشرفته آب و فاضلاب، دانشگاه رازی

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [eghbalzadeh@gmail.com](mailto:eghbalzadeh@gmail.com)

### چکیده

یکی از روش‌های کاهش آبشستگی، استفاده از شکاف در پایه‌های پل می‌باشد. در این تحقیق جریان اطراف پایه پل استوانه‌ای شکل بدون شکاف و شکاف‌دار در بستر صاف توسط نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی گردید. برای بستن معادلات ناویراستوکس مدل آشفتگی RNG  $k-\epsilon$  مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا نتایج مدل عددی در خصوص پارامترهای سرعت و تنش برشی در حالت پایه بدون شکاف با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد، که تطابق نسبتاً مناسبی را نشان داد. سپس اثر شکاف و عرض آن بر الگوی جریان در اطراف پایه بررسی شد. با افزایش عرض شکاف، جریان‌های چرخشی تشکیل شده در پایین دست پایه، تضعیف شده و در حالت شکاف با بیشترین عرض کاملاً حذف شدند. با افزایش عرض شکاف، مقدار سرعت حداکثر ایجاد شده در مجاورت پایه کاهش یافته، ولی محل تشکیل آن نسبتاً ثابت بود. همچنین بدلیل اینکه با افزایش عرض شکاف، در سرعت طولی جریان نزدیک شونده به پایه کاهش کمتری ایجاد می‌گردید، الگوی تنش برشی در مجاورت بالادست پایه رفتاری مشابه حالت جریان بالا دست پایه نشان می‌داد.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، پایه پل، شبیه‌سازی عددی، شکاف، FLOW-3D

## Numerical Study of the Slot Width Effect on Flow Pattern Around a Bridge Pier

A Asadi Parto<sup>1</sup>, A Eghbalzadeh<sup>2,3\*</sup> and M Javan<sup>2,3\*</sup>

Received: 16 February 2012 Accepted: 29 May 2013

<sup>1</sup>-M.Sc Student, Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Razi Univ., Iran.

<sup>2</sup>-Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Razi Univ., Iran.

<sup>3</sup>-Water and Wastewater Res. Cent., Razi Univ., Iran.

\*Corresponding Author Email: [eghbalzadeh@gmail.com](mailto:eghbalzadeh@gmail.com)

### Abstract

Using slot in bridge piers is one of the reduction methods of scour depth around them. In this study, the flow field around a cylindrical pier located in a smooth bed with and without slot was simulated using FLOW-3D software. The RNG k- $\epsilon$  turbulence model was used for closing the Navier-Stokes equations. The comparison of the numerical results and laboratory measurements for one bridge pier without slot showed that the model could predict velocity and shear stress parameters with reasonable accuracy. The influence of the slot width on the flow field around bridge pier was then investigated. The formed vortex at downstream of the pier became smaller by increasing slot width. In the largest slot case, this vortex was completely disappeared. Also, by increasing slot width, the value of the maximum velocity occurred adjacent the pier decreased, but its location was fairly constant. Finally, because of the lower reduction of the longitudinal velocity of the flow in the vicinity of the upstream face of the pier for the largest slot, shear stress pattern in this area was similar to that of the upstream area.

**Keywords:** Bridge pier, Flow pattern, FLOW-3D, Numerical simulation, Slot

### مقدمه

می‌کنند. در نتیجه، نرخ حرکت رسوب و فرسایش به صورت موضعی در حوالی این سازه‌ها افزایش یافته و منجر به پایین رفتن موضعی بستر نسبت به تراز عمومی بستر آبراهه می‌گردد (بی‌نام 1386). این جریان‌های گردابه‌ای مکانیزم اصلی آبشستگی موضعی به حساب می‌آیند و باعث ایجاد حفره در اطراف سازه‌ها می‌شوند (هامیل 1999).

با توجه به اهمیت موضوع بررسی الگوی جریان و آبشستگی در اطراف پایه پل‌ها، تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده است. این تحقیقات را می‌توان به

مطالعه سازه‌هایی که در معرض جریان آب قرار دارند همواره مورد توجه محققین هیدرولیک بوده است. آبشستگی موضعی در تنگ‌شدگی مسیر جریان، اطراف پایه‌های پل و تکیه‌گاه‌های آن، اطراف آبشکن‌ها، صفحات مستغرق، آستانه، پایین‌دست سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی و غیره رخ می‌دهد. در پیرامون این سازه‌ها، سرعت موضعی جریان و آشفتگی افزایش یافته و بسته به شکل سازه، گردابه‌هایی ایجاد می‌شوند که نیروهای فرسایشی اضافی را در اطراف سازه اعمال

درون بستر رودخانه قرار می‌گیرد، از جمله پارامترهای موثر بر جریان در اطراف شکاف هستند (ملویل 1998). استفاده از شکاف در پایه پل‌ها از جمله تهمیداتی است که در آن با کاهش قطر موثر پایه، قدرت گردابه کاهش یافته و عبور جریان از داخل شکاف موجب کاهش شدت گردایان فشاری رو به پایین در جلوی پایه می‌شود. رودکیوی و ساترلند (1981)، بابار و همکاران (2000)، بایرام و لارسن (2000)، حیدرپور (2002)، الرازک و همکاران (2003)، گرمالدی و همکاران (2009)، پیرمحمدی و حیدرپور (1385) و حیدرپور و همکاران (1386) تحقیقاتی برای بررسی اثر شکاف بر آبشستگی انجام داده‌اند. چیو (1992) تاثیر شکاف پایه را در کاهش عمق آبشستگی موضعی اطراف یک پایه پل دایروی مورد بررسی قرار داد. نتایج وی نشان داد که با افزایش عرض و طول شکاف ایجاد شده در پایه از میزان عمق آبشستگی کاسته خواهد شد. کومار و همکاران (1999)، پایه‌های پل با دو برابر اندازه بازشدگی شکاف و نیز طول‌های مختلف شکاف و زوایای مختلف قرارگیری نسبت به مسیر جریان را بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که با امتداد یافتن شکاف پایه تا بستر کانال بر میزان تاثیرات آن در کاهش عمق آبشستگی افزوده می‌گردد. حیدرپور و همکاران (1386) آزمایشاتی جهت بررسی تأثیر استفاده از شکاف مستطیلی در کنترل آبشستگی موضعی در گروه پایه‌های دوتایی و سه‌تایی با فواصل مختلف انجام دادند.

با توجه به نتایج بدست آمده از تحقیقات انجام شده و تاثیر قابل قبول شکاف پایه در کاهش عمق تعادلی آبشستگی موضعی اطراف پایه‌پل‌ها، استنباط می‌شود که این روش می‌تواند به عنوان روشی موثر در حفاظت پل‌ها در برابر آبشستگی موضعی مورد توجه مهندسين طراح قرار گیرد. امروزه شبیه‌سازی عددی بعنوان یکی از ابزارهای قدرتمند برای بررسی الگوی جریان مطرح شده اند. هزینه این روش نسبت به انجام

دو بخش آزمایشگاهی و عددی تقسیم‌بندی نمود. در زمینه تحقیقات آزمایشگاهی می‌توان به تحقیقات اتما و همکاران (1998)، سامر و فردسو (2002)، دی و همکاران (2008)، عطایی آشتیانی و همکاران (2010) و امینی و همکاران (2011) اشاره نمود. دی و همکاران (2008) با انجام آزمایشاتی، عمق آبشستگی در شرایط آب زلال را در اطراف پایه‌های استوانه‌ای مستغرق و غیر مستغرق در شرایط یکسان جریان و رسوب مقایسه نمودند. بر اساس نتایج بدست آمده توسط آنها، با افزایش نسبت استغراق، عمق آبشستگی و همچنین ابعاد و قدرت گردابه‌های نعل اسبی کاهش می‌یافت. امینی و همکاران (2011) آبشستگی در اطراف گروه پایه‌های پل را در شرایط آب زلال مورد بررسی قرار دادند. آنها بر اساس یافته‌های آزمایشگاهی روشی برای پیش‌بینی تاثیر نحوه قرارگیری گروه پایه‌ها و فاصله بین پایه‌ها بر آبشستگی موضعی ارائه نمودند. در زمینه تحقیقات عددی، رولاند و همکاران (2005) به شبیه‌سازی الگوی جریان در بسترهای صلب و زبر و آبشستگی با استفاده از مدل عددی پرداختند. نائینی و فضل (1389) با استفاده از نرم‌افزار FLUENT، جریان دو بعدی اطراف پایه را شبیه‌سازی کردند و میزان اثرگذاری شکل پایه روی الگوی شکل‌گیری جریان، بزرگی گردابه‌ها و پارامترهای شکست گردابه از جمله ضریب درگ و ضریب لیفت را بررسی کردند. کریمی‌نیا و صالحی نیشابوری (1390) با استفاده از نرم‌افزار FLUENT به شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی الگوی جریان حول پایه پرداختند و تاثیر پایه را در تولید فرآب مورد بررسی قرار دادند.

در سال‌های اخیر استفاده از شکاف در پایه پل به عنوان روشی جدید در کاهش آبشستگی موضعی مطرح گردیده است. هدف اصلی از شکاف، کاهش انحراف جریان به سمت بستر و در نتیجه کاهش قدرت برخورد جریان روبه پایین با بستر رودخانه می‌باشد. عرض، طول و محل قرارگیری شکاف و طولی از آن که

## روش حل

در نرم افزار FLOW-3D برای شبیه‌سازی میدان جریان، معادلات ناویراستوکس با استفاده از روش حجم محدود بر روی یک شبکه جابجا شده حل می‌شوند. در شبیه‌سازی سطح آزاد از روش TruVOF استفاده شده است. در این روش با حل معادله جابجایی زیر،  $F$  بعنوان جزء حجم سیال در یک سلول سطح آزاد محاسبه می‌شود.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \left( \frac{\partial}{\partial x} (FuA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FwA_z) \right) \right\} = 0 \quad [5]$$

در صورتی که  $F=0$  باشد، سلول پر از هوا و در صورتی که  $F=1$  باشد، سلول پر از آب می‌باشد. سطح آزاد جایی تعیین می‌شود که در آن  $F=0.5$  است.

برای مدل‌سازی آشفتگی در تحقیق حاضر از مدل آشفتگی  $k-e$  استفاده شده است. این مدل نسبت به مدل آشفتگی  $k-e$  استاندارد به ثابت‌های تجربی کمتری نیاز داشته و برای شبیه‌سازی نواحی دارای جداسازی جریان، عملکرد بهتری نشان داده است (سیسیلیان و همکاران 1987). معادلات مربوط به این مدل در راهنمای نرم‌افزار FLOW-3D بطور کامل ارائه شده‌اند. با توجه به اینکه جریان بالادست پایه پل توسعه یافته است، در شبیه‌سازی عددی ابتدا جریان در کانال باز بدون پایه به طول 20 متر مدل شد تا در انتهای کانال، نیمرخ سرعت جریان توسعه یافته ایجاد شود. سپس از این پروفیل سرعت بعنوان شرط مرزی ورودی کانال با پایه پل استفاده شد.

## میدان محاسباتی

در این مطالعه جهت صحت‌سنجی مدل عددی از آزمایش‌های انجام شده توسط رولاند و همکاران (2005) در حالت پایه بدون شکاف بهره گرفته شده است، آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی افقی به طول

تحقیقات آزمایشگاهی کمتر می‌باشد. بنابراین هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی عددی میدان جریان اطراف پایه پل استوانه‌ای شکل بدون شکاف و پایه‌های شکافدار با عرضهای مختلف شکاف توسط نرم‌افزار FLOW-3D و بررسی تاثیر هر کدام از شکاف‌ها بر میدان جریان، تنش برشی و گردابه‌های اطراف پایه پل می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

## معادلات حاکم بر جریان

در تحقیق حاضر از نرم افزار FLOW-3D به منظور شبیه‌سازی میدان جریان استفاده شد. در این نرم افزار معادلات ناویراستوکس رینولدزی برای تحلیل سه‌بعدی در حالت سیال تراکم ناپذیر در دستگاه مختصات کارتزین  $(x,y,z)$  که به روش حجم محدود حل می‌شوند، بصورت زیر می‌باشند:

$$V_F \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial (ruA_x)}{\partial x} + \frac{\partial (rvA_y)}{\partial y} + \frac{\partial (rwA_z)}{\partial z} = R_{SOR} \quad [1]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z}) =$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z}) =$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z}) =$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z$$

که در آن  $(u, v, w)$  مولفه‌های سرعت،

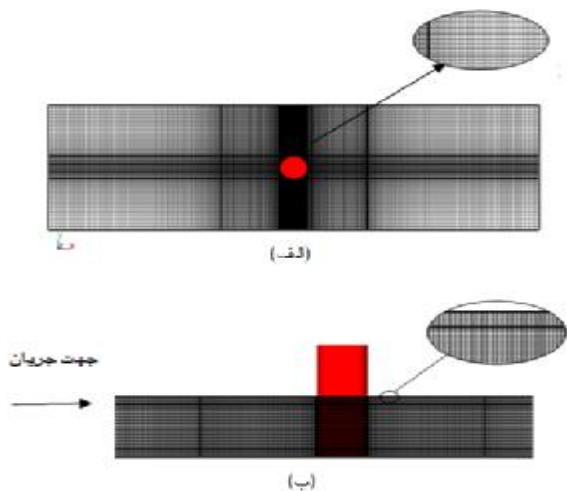
$(A_x, A_y, A_z)$  کسری از مساحت مرتبط با جریان،  $(G_x, G_y, G_z)$  شتاب جرمی و  $(f_x, f_y, f_z)$  شتاب لزجت در جهت های  $(x,y,z)$ ، چگالی سیال،  $R_{SOR}$  ترم چشمه،  $V_F$  کسری از حجم مرتبط با جریان و  $P$  فشار، می‌باشند.

طول میدان محاسباتی معادل 10 متر است که پایه پل با قطر 0/536 متر در مرکز آن واقع شده است. برای شبکه مورد استفاده در میدان محاسباتی، از یک شبکه غیریکنواخت که در اطراف پایه ریزتر است، استفاده شده است. در شکل 2 شبکه مورد استفاده در میدان محاسباتی نمایش داده شده است. در جدول 2 تعداد سلول‌های مورد استفاده در جهت‌های مختلف  $x, y, z$  ارائه شده‌اند.

فاصله اولین سلول از دیواره‌ها طوری انتخاب شد که از محاسبات در زیر ناحیه لزج اجتناب شود. برای این منظور اولین گره در محلی قرار داده شد که پارامتر بدون بعد  $y^+$  که بر اساس رابطه 6 تعریف می‌شود، در محدوده 30 قرار گیرد (بی‌نام 2011).

$$y^+ = \frac{y_p \times u_*}{\nu} \quad [6]$$

که در آن  $y_p$  فاصله اولین گره از دیواره در جهت عمود بر آن،  $u_*$  سرعت برشی دیواره و  $\nu$  لزجت سینماتیکی می‌باشند.



شکل 2- نحوه شبکه بندی میدان محاسباتی (الف) پلان، (ب) نمای عرضی.

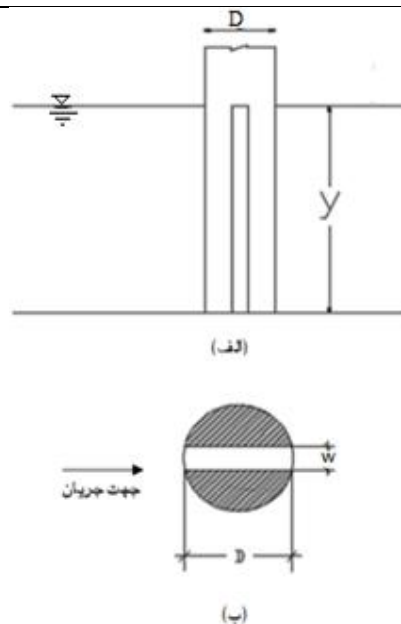
#### شرایط مرزی

با توجه به اینکه شبیه‌سازی در نرم افزار *FLOW-3D* بر اساس روش *VOF* انجام می‌شود. ارتفاع

28 متر، عرض 3 متر و ارتفاع 1 متر با بستر صاف انجام شد. شرایط هیدرولیکی حاکم بر جریان در این تحقیق شامل سرعت آب ورودی ( $u$ ) برابر 32/6 سانتیمتر بر ثانیه، عمق آب ( $v$ ) برابر 54 سانتیمتر و عدد فرود برابر 0/14 می‌باشد. پس از صحت‌سنجی مدل در ادامه تحقیق الگوی جریان در اطراف پایه‌پل شکاف‌دار بررسی شد. در این حالت اثر وجود شکاف و همچنین ابعاد آن بر خصوصیات مختلف میدان جریان بررسی گردید. شکل 1 نمای کلی از پایه‌های شکاف‌دار را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ارتفاع شکاف معادل عمق آب و طول آن معادل قطر پایه پل است. عرض‌های مختلف شکاف در جدول 1 ارائه شده‌اند.

جدول 1- مشخصات شکاف‌های تعبیه شده در پایه پل.

شکاف	$W$ : عرض شکاف (cm)
WS	0 (بدون شکاف)
S 10	10
S 20	20
S 30	30



شکل 1- نمایش شکاف در پایه استوانه‌ای (الف) نما در جهت قائم، (ب) نمای پلان.

پس از انجام صحت‌سنجی و اطمینان از عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی جریان در اطراف پایه پل، در ادامه تحقیق اثر ایجاد شکاف بر الگوی جریان بررسی شد. در شکل 4 برای بررسی الگوی جریان در اطراف پایه، خطوط جریان در صفحه با ارتفاع 18 سانتی متر از کف بصورت دو بعدی ترسیم شده است. طبق نتایج ارائه شده در این شکل در پایین دست بدون شکاف دو جریان چرخشی مستقل در پایین دست پایه تشکیل شده است، که یکی از آنها با فاصله نسبت به پایه قرار گرفته است (شکل 4- الف). در حالت پایه با شکاف 10 سانتی متر، مجدداً دو جریان چرخشی مشاهده می‌شوند، اما در این حالت این دو جریان کوچکتر شده و هر دو در مجاورت دو وجه کناری پایه قرار گرفته‌اند (شکل 4- ب). بتدریج با افزایش عرض شکاف از قدرت این جریان‌های چرخشی کاسته شده بطوری که در حالت شکاف با عرض 30 سانتی متری جریان‌های چرخشی کاملاً حذف شده‌اند (شکل 4- د).

تاثیر پایه به عنوان مانع در کانال بر روی توزیع سرعت طولی در بالادست کانال در محور مرکزی کانال و در مقاطع نشان داده شده در شکل 5، برای پایه‌های مختلف در شکل 6 نشان داده شده است.

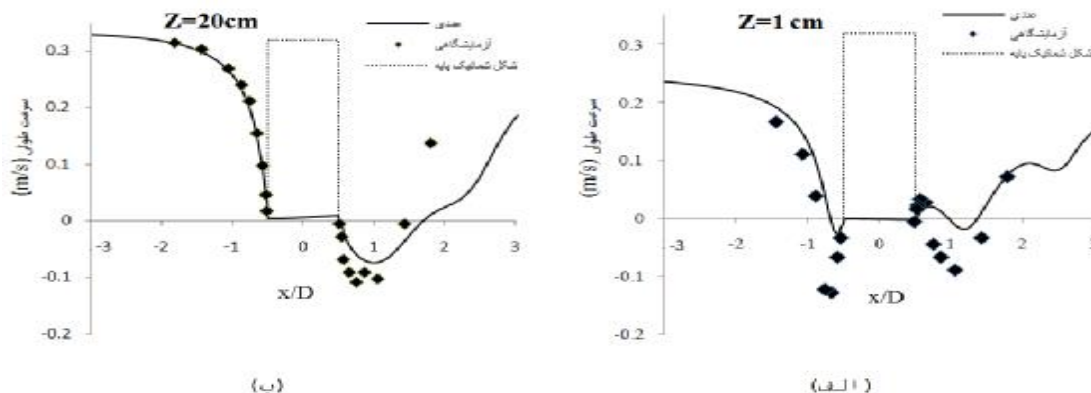
شبکه‌بندی شده در میدان محاسباتی بیشتر از عمق آب و معادل 0/7 متر انتخاب شد. در مرز بالایی از شرط مرزی تقارن استفاده شد. در مرز ورودی شرط مرزی سرعت معلوم و در مرز خروجی، شرط مرزی فشار مشخص مورد استفاده قرار گرفتند. در مرز خروجی عمق آب معادل 0/54 متر تعیین شد. در جداره‌های کانال از شرط مرزی دیوار استفاده شده است.

### نتایج و بحث

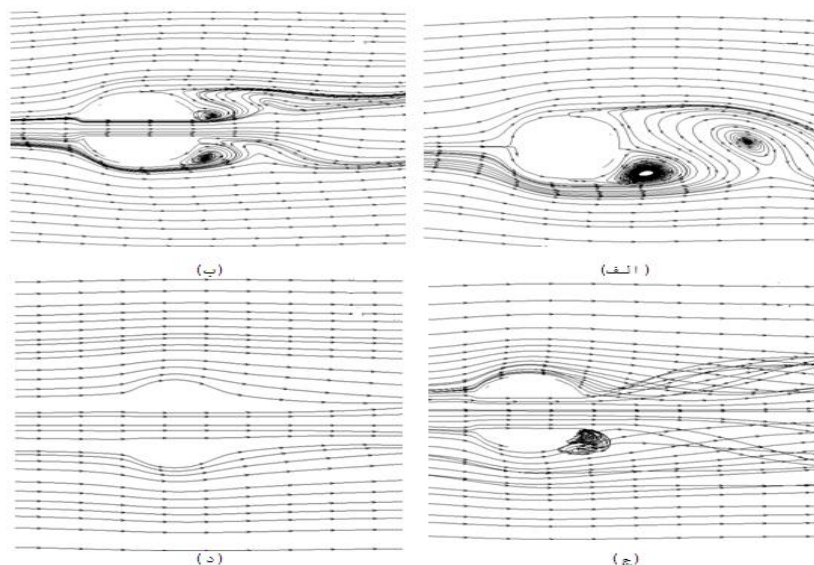
همان‌طور که اشاره شد، برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی حاضر از نتایج آزمایشگاهی رولاند و همکاران (2005) استفاده شده است. در شکل 3 توزیع سرعت طولی در دو فاصله مختلف 1 (شکل 3- الف) و 20 (شکل 3- ب) سانتی متری از کف در محور وسط کانال، بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق نسبتاً خوبی بویژه در بالادست پایه پل بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. خطای نسبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در  $X/D = -1.5$  برای  $z = 1\text{ cm}$  کمتر از 8 درصد و برای  $z = 20\text{ cm}$  کمتر از 2 درصد است. اما در نواحی نزدیک به پایه خطای بیشتری بویژه در حالت فاصله 1 سانتی متری از کف مشاهده می‌شود که می‌توان دلیل آن را پیچیدگی زیاد جریان گردابه ای در این ناحیه دانست.

جدول 2- تعداد سلول‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی.

نوع شبکه‌بندی	تعداد سلول در راستای X	تعداد سلول در راستای Y	تعداد سلول در راستای Z
غیریکنواخت	350	80	60

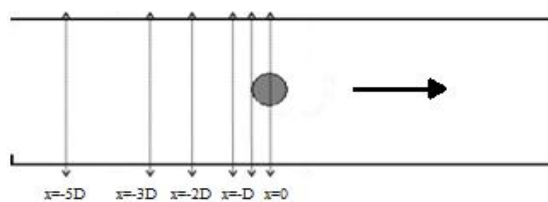


شکل 3- مقایسه توزیع سرعت طولی بین نتایج عددی و مقادیر آزمایشگاهی رولاند و همکاران (2005) در محور وسط کانال (الف) 1 سانتی متری از بستر، (ب) 20 سانتی متری از بستر.



شکل 4- خطوط جریان اطراف پایه با (الف) پایه بدون شکاف، (ب)  $S10$ ، (ج)  $S20$ ، (د)  $S30$ .

گرفت با فاصله گرفتن از پایه و در حدود فاصله‌ای معادل 5 برابر قطر پایه، الگوی جریان تحت تاثیر پایه نیست. پس از آن با نزدیک شدن به پایه مقادیر سرعت افقی کاهش می‌یابد. در نمودار شکل 7 مقدار بدون بعد اختلاف حداکثر سرعت نسبت به سرعت متوسط، بین مقاطع  $x=-5D$  و  $x=-D$  برای پایه‌های مختلف نشان داده شده است. این مقدار برای حالت پایه بدون شکاف معادل  $0/24U_0$  (0/0784 متر بر ثانیه) و برای حالت پایه  $S30$  معادل  $0/059U_0$  (0/0192 متر بر ثانیه) می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت پایه



شکل 5- نمونه‌ای از شکل کانال و مقاطع مورد بررسی.

چنان‌که در شکل 6 مشاهده می‌شود با فاصله گرفتن از پایه، تغییرات توزیع سرعت در طول کانال کمتر می‌شود بطوری که در توزیع سرعت  $x=-3D$ ، اختلاف ناچیزی وجود دارد. پس می‌توان نتیجه

ب) نشان داده شده، محل تشکیل سرعت حداکثر در تمام حالت‌ها یکسان بوده و در حدود  $0/3$  متری از مرکز پایه (فاصله  $3/2$  سانتی متر از جداره پایه) قرار دارد. مقدار آن هم در حالت بدون شکاف بیشترین مقدار را داشته و معادل  $0/58$  متر بر ثانیه ( $1/78U_0$ ) است. با افزایش عرض شکاف مقدار این سرعت کاهش می‌یابد و برای حالت  $S30$  به  $0/51$  متر بر ثانیه ( $1/56U_0$ ) می‌رسد.

در شکل 11، تنش برشی بستر در طول محور مرکزی کانال در بالادست پایه بدون شکاف که براساس نتایج مدل عددی محاسبه شده و با کار آزمایشگاهی رولاند و همکاران (2005) مقایسه شده است. در این شکل  $t$  تنش برشی محاسبه شده بر اساس مدل عددی و  $t_{\infty}$  تنش برشی آشفته، که از فرمول  $t_{\infty} = \tau u_f^2$  محاسبه می‌شود.  $u_f$  سرعت اصطکاکی می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که نتایج آزمایشگاهی و عددی تطابق نسبتاً خوبی دارند.

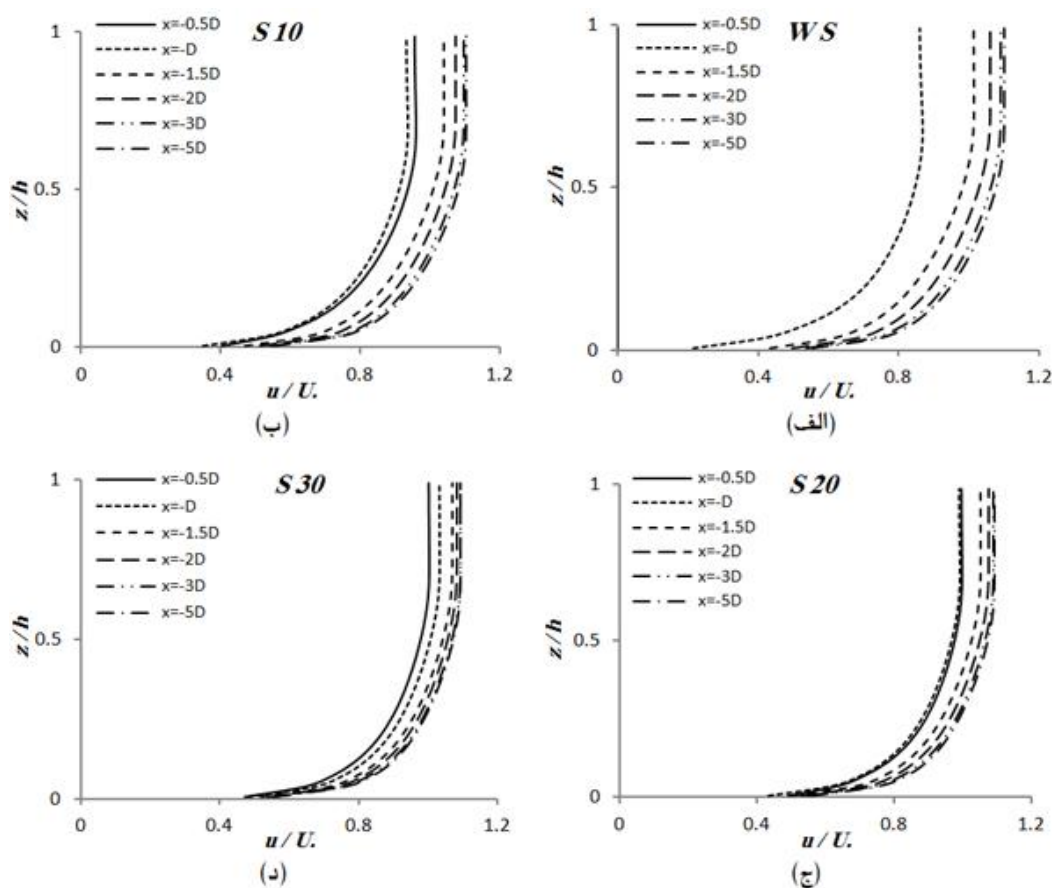
براساس شکل 11 در مجاورت پایه پیل به دلیل جریان چرخشی، تنش برشی منفی ایجاد شده است. طول این ناحیه تقریباً به اندازه شعاع پایه می‌باشد. علیرغم پیش‌بینی صحیح طول این ناحیه توسط مدل عددی، مقداری اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در تنش برشی وجود دارد. دلیل آن را می‌توان مکانیزم پیچیده گردابه نعل اسبی تشکیل شده در این قسمت دانست. تنش برشی منفی بستر متناظر با مکان گردابه‌های نعل اسبی است که در مدل عددی به خوبی پیش‌بینی شده است.

بدون شکاف بیشترین اختلاف وجود دارد. با افزایش عرض شکاف این مقدار کاهش می‌یابد.

در شکل 8 مقایسه توزیع سرعت افقی در فواصل  $x=-0.5D$ ،  $x=-D$  برای پایه‌های مختلف انجام شده است. تغییرات توزیع سرعت در پایه‌ها در نزدیک پایه شدیدتر است و با فاصله گرفتن از پایه‌ها، اختلاف بین توزیع سرعت‌های افقی کاهش می‌یابد. طبق نتایج ارائه شده در این شکل، در حالت پایه پیل بدون شکاف کمترین مقادیر سرعت در محل  $x=-D$  وجود دارند و با افزایش عرض شکاف، مقادیر سرعت‌ها افزایش می‌یابد (شکل 8- الف). در محل ابتدای پایه (شکل 8- ب) که فقط در حالت وجود شکاف، سرعت وجود دارد. در حالت‌های  $S20$  و  $S30$  سرعت‌های افقی تقریباً یکسان و بیشتر از مقادیر سرعت در حالت  $S10$  می‌باشند.

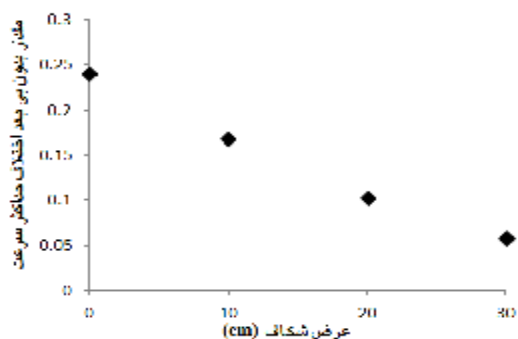
شکل 9 مقایسه توزیع سرعت‌های افقی در جهت عرضی در سه تراز ارتفاعی نزدیک بستر ( $2/5$  میلی‌متر)، وسط کانال ( $27$  سانتی‌متر) و نزدیک سطح آب ( $50$  سانتی‌متر) را برای پایه‌های مختلف، برای مقطع  $x=0$  (مرکز پایه) نشان می‌دهد. بخاطر وجود پایه در این مقطع، تغییرات عمده سرعت افقی در جهت عرضی مشاهده می‌شود. این توزیع سرعت‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تراز ارتفاعی، مقادیر سرعت‌ها نیز افزایش می‌یابد، بطوری که در تراز نزدیک سطح آب، بیشترین مقدار سرعت‌ها تشکیل می‌شود. با شکاف‌دار شدن پایه و همچنین با افزایش عرض شکاف، از مقدار سرعت‌ها کاسته می‌شود. در نزدیک پایه، بیشترین مقدار سرعت تشکیل می‌شود. در شکل 10 مقدار سرعت حداکثر و محل تشکیل آن در تراز ارتفاعی  $50$  سانتی‌متری از بستر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (10-





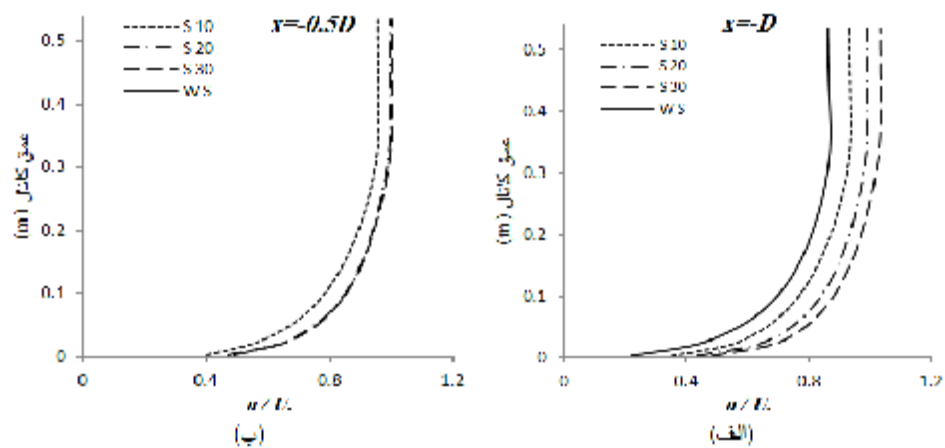
شکل 6- توزیع سرعت طولی در راستای قائم برای (الف) پایه بدون شکاف، (ب) *S10*، (ج) *S20*، (د) *S30*.

است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده با ایجاد شکاف در پایه، تنش برشی منفی در بالادست پایه مشاهده نمی‌شود. چرا که با وجود شکاف جریان برگشتی که در حالت پایه بدون شکاف تشکیل می‌شد، دیگر وجود ندارد. اما در پایه‌های شکاف‌دار، با نزدیک شدن به پایه، تنش برشی بطور نسبتاً تدریجی کاهش یافته و در مجاورت پایه افزایش می‌یابد. با افزایش عرض شکاف این روند بصورت ملایم‌تری انجام می‌شود. در حالت پایه با شکاف *S30* مقدار این کاهش و افزایش بسیار کمتر شده است.

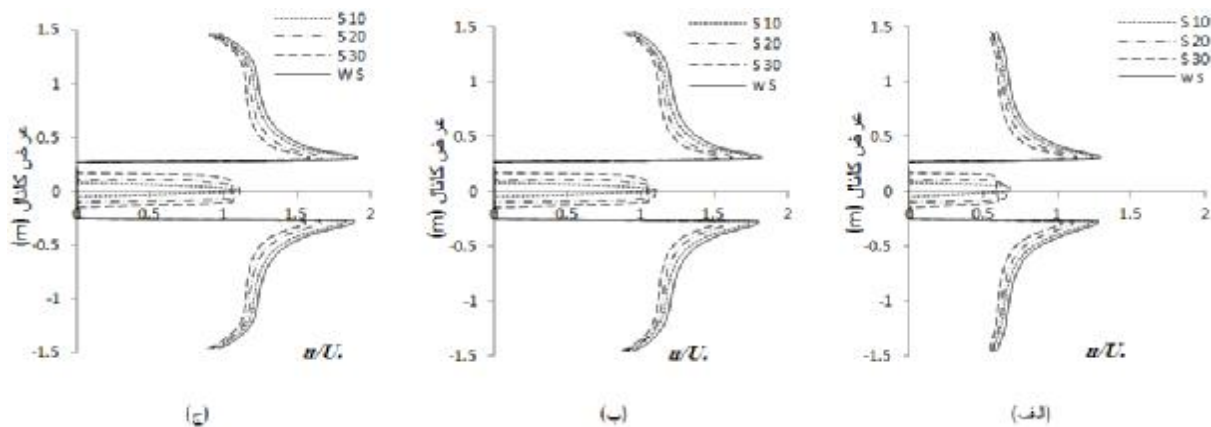


شکل 7- مقدار بدون بعد اختلاف حداکثر سرعت نسبت به سرعت متوسط بین مقاطع  $x=-5D$  و  $x=-D$  برای پایه‌های مختلف.

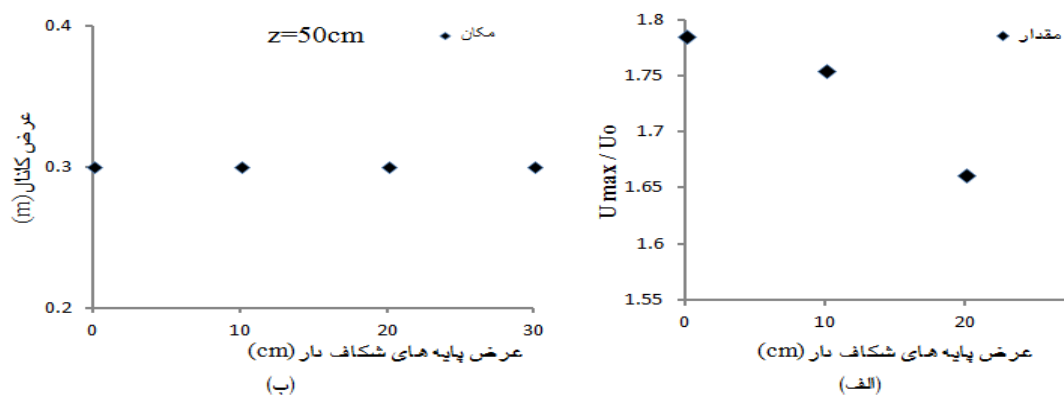
در شکل 12 مقایسه توزیع تنش برشی برای پایه‌های مختلف در طول محور مرکزی کانال نمایش داده شده



شکل 8- توزیع سرعت افقی در راستای قائم در فواصل (الف)  $x=-D$  (ب)  $x=-0.5D$



شکل 9- مقایسه توزیع سرعت طولی در جهت عرضی در مقطع  $x=0$  در ارتفاع (الف) 2/5 میلی متر، (ب) 27 سانتی متر و (ج) 50 سانتی متری از کف کانال.



شکل 10- توزیع مقدار و مکان سرعت حداکثر در پایه ها.

### نتیجه‌گیری کلی

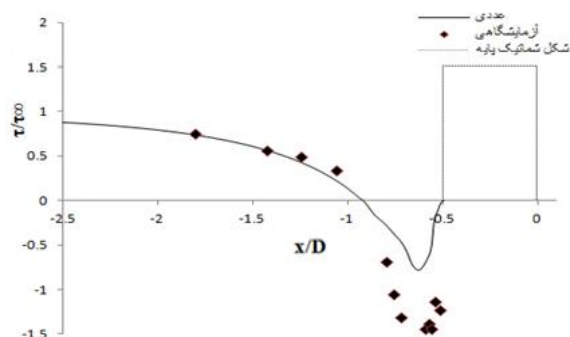
در این تحقیق، شبیه‌سازی سه بعدی جریان اطراف پایه‌پل به کمک نرم افزار *FLOW-3D* به منظور مطالعه اثر شکاف‌ها بر الگوی جریان در حالت تک پایه انجام شده است. مهمترین نتایج تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

- تطابق نسبتاً مناسبی بین نتایج بدست آمده از مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی در خصوص پارامترهای سرعت و تنش‌برشی وجود داشت.

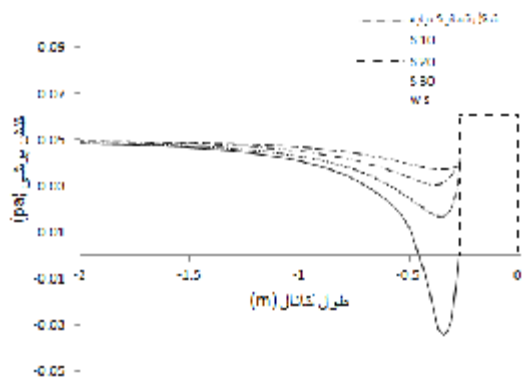
- با ایجاد شکاف در پایه، جریان‌های چرخشی تشکیل شده در پایین‌دست پایه، ضعیف شده چنان‌که در پایه *S30* این جریان‌های چرخشی کاملاً حذف شدند.  
- با افزایش عرض شکاف سرعت طولی جریان نزدیک شونده به پایه در محور مرکزی کانال کاهش کمتری نشان می‌داد.

- با افزایش عرض شکاف، مقدار سرعت حداکثر ایجاد شده در مجاورت پایه کاهش می‌یافت، ولی محل تشکیل آن نسبتاً ثابت بود.

- در بالادست پایه بدون شکاف به دلیل تشکیل جریان‌های چرخشی، تنش‌برشی منفی ایجاد می‌گردد. اما در پایه‌های شکاف‌دار، با نزدیک شدن به پایه، تنش‌برشی بطور نسبتاً تدریجی کاهش یافته و در مجاورت پایه افزایش می‌یافت. با افزایش عرض شکاف این روند بصورت ملایم‌تری انجام می‌شد.



شکل 11- مقایسه توزیع تنش برشی در بالادست پایه بدون شکاف بین نتایج عددی و مقادیر آزمایشگاهی رولاند و همکاران (2005).



شکل 12- مقایسه توزیع تنش برشی در پایه‌های مختلف بر اساس نتایج عددی.

### منابع مورد استفاده

- بی‌نام، 1386، راهنمای روشهای محاسبه آبشستگی موضعی، نشریه شماره 318. انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.
- پیر محمدی ر و حیدرپور م، 1385. بررسی شکل و ابعاد محدوده سنگ چین اطراف پایه‌های استوانه‌ای پل‌ها برای کنترل آبشستگی موضعی. هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران. 21-18 اردیبهشت ماه. دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- حیدرپور م، افضل‌ی مهر ح و خدارحمی ز، 1386. حفاظت گروه پایه‌های استوانه‌ای پل در برابر آبشستگی موضعی با استفاده از شکاف. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. جلد چهاردهم. شماره 3، صفحه‌های 174 تا 185.

- کریمی‌نیا ا و صالحی نیشابوری ع، 1390. شبیه سازی عددی پدیده فرآب در پایه های پل. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری دانشکده فنی. دوره 45، شماره 4. صفحه‌های 487 تا 493.
- نائینی ت و فضل‌ی م، 1389. مدل سازی عددی و مشاهده اثر شکل مقاطع پایه پل‌ها بر نیروهای دینامیکی وارد بر آن. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری. دوره 44، شماره 5. صفحه‌های 741 تا 751.
- Amini A, Melville BW, Ali TM and Ghazali AH, 2011. Clearwater local scour around pile groups in shallow-water flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 138(2): 177-185.
- Anonymous, 2011. FLOW 3D User's Manual. Version 10.0. Flow Science Inc., in the USA and other countries.
- Ataie-Ashtiani B, Baratian-Ghorghi Z and Beheshti AA, 2010. Experimental investigation of clear-water local scour of compound piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 136(6): 343-351.
- Babar R, Setia S and Setia B, 2000. Scour protection by a slot through a model bridge pier. *Proceeding of international Symposium on Recent advances in Experimental Fluid Mechanics*, December 18-20. Indian Institute of Technology. Kanpur, India.
- Bayram A and Larson M, 2000. Analysis of scour around group of vertical piles in the field. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 216(4): 215-220.
- Chiew YM, 1992. Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 118(9): 1260-1269.
- Dey S, Raikar RV and Roy A, 2008. Scour at submerged cylindrical obstacles under steady flow. *Journal of hydraulic Engineering*, ASCE 134(1): 105-109.
- El-Razek MA, El-Motaleb MA and Bayoumy M, 2003. Scour reduction around bridge piers using internal openings through the pier. *Journal of Alexandria Engineering* 42(2): 241-248.
- Ettema R, Melville BW and Barkdoll B, 1998. Scale effect in pier-scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 124(6): 639-642.
- Grimaldi C, Gaudia R, Calomino F and Cardoso A H, 2009. Countermeasures against local scouring at bridge piers. slot and combind system of slot bed sill. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 135(5): 425-431.
- Hamil L, 1999. *Bridge hydraulic*. E and FN Spon Co. London.
- Heidarpour M, 2002. Control and reduction of local scour at bridge piers by using slot. *International Conference on Fluvial Hydraulics*. September 3-6. Louvain-la-Neuve, Belgium.
- Kumar V, Ranga Raju K G and Vittal N, 1999. Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 125(12): 1302-1305.
- Melville B W, 1998. Effect of pier shape on local scour. *Mini symposium on bridge scour*. International water resource engineering conference. August 3-7. Memphis, USA.
- Raudkivi AJ and Sutherland AJ, 1981. Scour at bridge piers. *Road Research Unit. Bulltin 54*. Wellington, New Zealand.
- Roulund A, Sumer BM, Fredsøe J and Michelsen J. 2005. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanic* 534: 215-401.
- Sicilian JM, Hirt CW and Harper RP, 1987. FLOW-3D: Computational modeling power for scientists and engineers. Report FSI-87-00-1, Flow Science, Los Alamos, NM.
- Sumer BM and Fredsøe J, 2002. *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. World Scientific.