

مطالعه‌ی آزمایشگاهی الگوی جریان پیرامون سری پایه‌ی پل سه‌تایی عمود بر جهت جریان مستقر در قوس 180° درجه با بستر صلب

محمدجواد طبیب نژاد مطلق (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد واقفی* (دانشیار)

سید شاکر هاشمی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۸
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۲/۱، ص. ۳۷-۲۷

در نوشتار حاضر، به بررسی الگوی جریان در قوس تند با بستر صلب و توأم با سری پایه‌ی پل سه‌تایی عمود بر جهت جریان پرداخته شد. شرایط جریان از قبیل عمق و دبی به نحوی انتخاب شد که در صورت انجام آزمایش با بستر متحرک، شرایط نزدیک به آستانه‌ی حرکت برقرار شود. پژوهش حاضر به بررسی و تجزیه و تحلیل نحوه‌ی شکل‌گیری گردابه‌ها، میزان طول و عرض ناحیه‌ی جدانشدگی، ابعاد گردابه‌های ایجاد شده در بالادست و پایین‌دست پایه‌ها و نحوه‌ی تغییر موقعیت سرعت بیشینه در ترازهای مختلف نسبت به بستر در پلان پرداخته و نتایج حاصل از آن را ارائه کرده است. از مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر این است که ناحیه‌ی اثرگذاری پایه‌ها در جدایی خطوط جریان از یکدیگر در جهت طولی $1/4$ قطر پایه به سمت بالادست و $3/5$ برابر قطر پایه به سمت پایین‌دست و در جهت عمود بر جریان تقریباً $1/4$ برابر قطر پایه به سمت ساحل داخلی اولین پایه و 1 برابر قطر پایه به سمت ساحل خارجی پایه‌ی سوم است.

javad.tabib@yahoo.com
vaghefi@pgu.ac.ir
sh.hashemi@pgu.ac.ir

واژگان کلیدی: الگوی جریان، پایه‌ی پل سه‌تایی، قوس 180° درجه، سرعت
سه‌بعدی، بستر صلب.

۱. مقدمه

به‌طرف سطح آب بیشتر می‌شود، فشار بیشتری نیز در ترازهای بالاتر روی پایه ایجاد می‌شود و به این ترتیب گرادیان فشاری روی پایه از بالا به پایین به وجود می‌آید، که خود باعث ایجاد یک جریان رو به پایین در جلو پایه است.^[۱] از اندرکنش جریان با پایه‌ی پل، گردابه‌ی نعل اسبی پدید می‌آید که همانند گردباد، ذرات بستر را جدا می‌کند و در معرض جریان قرار می‌دهد و به انتقال ذرات از جلو و اطراف پایه به سمت پایین‌دست کمک می‌کند.^[۲] بنابر آنچه در مورد الگوی جریان درون قوس و اطراف پایه‌های پل شرح داده شد، الگوی جریان در قوس به همراه پیچیدگی جریان حول پایه‌ی استوانه‌ای، شرایط الگوی جریان را پیچیده‌تر می‌سازد. از آنجایی که برخی از پل‌ها در مسیر رودخانه در محل قوس ساخته شده‌اند و با توجه به ساختار متفاوت جریان در چنین بازه‌هایی در مسیر رودخانه و نیز اهمیت بررسی ساختار جریان و تخمین عمق آب‌شستگی در اطراف پایه‌ی پل، مطالعه‌ی بیشتر ساختار جریان در اطراف پایه‌های پل واقع در قوس ضروری به نظر می‌رسد. از این رو هدف از پژوهش حاضر، بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان پیرامون گروه پایه‌ی سه‌تایی پل عمود بر جهت جریان در کانال با قوس 180° درجه‌ی تند است.

از جمله مطالعات انجام شده در این راستا می‌توان به این موارد اشاره کرد: در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی با استفاده از یک کانال مستطیلی با پلان دایره‌ای شکل

مسیر رودخانه‌ها در طبیعت توأم با قوس‌ها و پیچان رودهاست و معمولاً قسمت‌های خمیده‌ی یک رودخانه از جمله بازه‌های بحرانی در شناسایی رفتار هیدرولیکی رودخانه‌ها هستند. ساختار جریان در پیچان رودها، پیچیده‌تر از رودخانه‌های با مسیر مستقیم است. طبیعت سه‌بعدی جریان و آشفتگی‌های موجود و تغییرات عمق جریان در قوس باعث تشکیل جریان‌های ناشناخته‌یی در قوس رودخانه‌ها می‌شود. همه ساله هزاران پل در سراسر جهان در اثر آب‌شستگی در اطراف پایه‌های آن‌ها تخریب می‌شوند.^[۱] تخریب‌ها و خسارت‌های وارده‌ی ذکر شده علاوه بر تلفات جانی و ضررهای مالی، سبب قطع راه‌های ارتباطی می‌شوند که بدین ترتیب حمل‌ونقل را نیز مختل می‌کند.^[۲]

علاوه بر ساختار زمین و رودخانه‌ها که یکی از عوامل مهم در فرسایش است، عوامل هیدرولیکی نیز نقش به‌سزایی در وقوع پدیده‌ی فرسایش ایفا می‌کنند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به نقش الگوی جریان عبوری از میان پایه‌ها اشاره کرد. پس از برخورد جریان به دماغه‌ی پل، با توجه به اینکه سرعت جریان از بستر رودخانه

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۱/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۶/۴/۱۱، پذیرش ۱۳۹۶/۴/۱۹.

DOI:10.24200/J30.2018.1978.2050

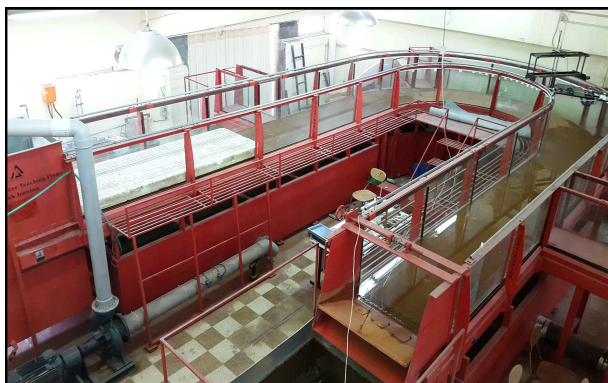
در 20° درجه رخ داده است.^[۲۰] همچنین برخی پژوهشگران در سال 2015 ، به بررسی تأثیر کج‌شدگی پایه‌ی منفرد و دایره‌بی‌شکل پل در صفحه‌ی عمود بر جریان در بیشینه‌ی عمق و شکل و سایر پارامترهای حفره‌های آب‌شستگی پرداختند.^[۲۱] مطالعه‌ی تغییرات زمانی بستر در قوس 180° درجه‌ی تند با زوج پایه‌ی همگرا و همچنین بررسی پارامتر زمان در آزمایش‌ها نشان داد که در ابتدای آزمایش، پایه‌ی نزدیک به ساحل خارجی، فرسایش بیشتری دارد؛ ولی بعد از گذشت 20% زمان تعادل نسبی، سرعت آب‌شستگی در هر دو پایه یکسان است. همچنین زمان تعادل از 10% به 50% باعث کاهش 20 درصدی عمق چاله‌ی آب‌شستگی بیشینه است.^[۲۲] همچنین در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی (2016) با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج ADV به بررسی الگوی جریان و محاسبه‌ی تنش برشی در قوس 180° درجه تند پرداخته شد و نتایج نشان داد که بیشترین مقدار تنش برشی در نزدیکی بستر در زاویه‌ی 40° درجه رخ می‌دهد.^[۲۳]

در بررسی تأثیر کج‌شدگی پایه‌ی پل استوانه‌یی مستقر در رأس قوس 180° درجه‌ی تند در الگوی آب‌شستگی به صورت آزمایشگاهی (2016) نشان داده شد که بیشترین و کمترین میزان آب‌شستگی در چاله‌ی آب‌شستگی حول پایه به ترتیب در حالت کج شدن پایه به سمت ساحل خارجی و داخلی به میزان $1/70$ و $7/70$ برابر عمق جریان، که در مسیر مستقیم بالادست است، ایجاد می‌شود.^[۲۴] بررسی وضعیت الگوی جریان اطراف پایه‌های پل و نیز اثر فاصله بین آن‌ها در الگوی جریان و آب‌شستگی موضعی نشان داد که کمینه‌ی مقدار سرعت طولی در حفره‌ی آب‌شستگی رخ می‌دهد.^[۲۵]

۲. مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه خلیج فارس بوشهر انجام شده است. شعاع مرکزی کانال برابر 2 متر و عرض آن برابر 1 متر بوده است. کانال مذکور با قوس 180° درجه بود که با توجه به نسبت شعاع مرکزی به عرض کانال، در زمره‌ی قوس‌های تند است. نمایی از کانال آزمایشگاهی در شکل ۱ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل مذکور مشخص است که خم توسط دو بازه‌ی مستقیم در بالادست و پایین‌دست به ترتیب برابر $6/5$ و 5 متر به حوضچه‌ی ورودی و حوضچه‌ی انتهایی متصل می‌شود.

برای اندازه‌گیری سه‌بعدی سرعت از دستگاه سرعت‌سنج ADV ساخت شرکت NORTREK هلند با نرخ نمونه‌برداری 25 هرتز استفاده شد. در کف کانال از مصالح دانه‌بندی شده‌ی یکنواخت به قطر متوسط $1/5$ میلی‌متر و انحراف معیار



شکل ۱. تصویر واقعی از کانال مورد استفاده.

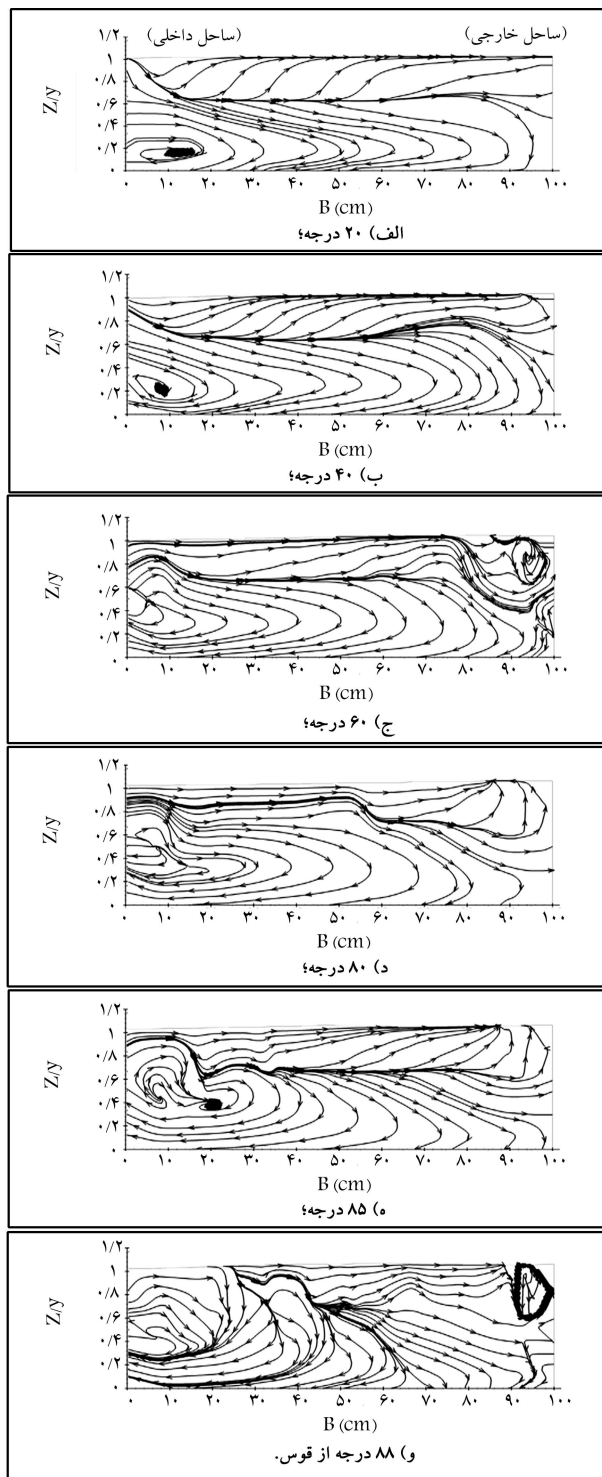
با زاویه‌ی مرکزی 45° تا 180° درجه، افزایش عمق آب در کناره‌ی جداری خارجی کانال بررسی و مشاهده شد که برای قوس انحنا‌ی ملایم، محل وقوع بیشینه‌ی سرعت در نیمه‌ی اول قوس به سمت جداری داخلی و با حرکت به سمت خروجی قوس به طرف جداری خارجی متمایل می‌شود.^[۵] بررسی توزیع سرعت در قوس منظم و با مقطع دوزنقه‌یی نشان داد که بیشینه‌ی سرعت با توجه به مشخصه‌های مدل فیزیکی در کناره‌ی دیواره‌ی داخلی ورودی رخ می‌دهد و سپس توزیع سرعت در عمق به سمت یکنواخت شدن میل می‌کند و در زاویه‌ی 60° درجه، سرعت بیشینه به طرف قوس خارجی حرکت می‌کند.^[۲۶] در مطالعه‌ی خصوصیات جریان در حفره‌ی آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌ی پل مستقر در مسیر مستقیم (1977)،^[۸] با اندازه‌گیری سه‌بعدی سرعت در قوس رودخانه‌یی کوچک در انگلیس با شعاع داخلی 19 متر نشان داده شد که الگوی سرعت در ورودی قوس به شعاع قوس بستگی ندارد، ولی در خروجی آثار الگوی جریان مربوط به قوس باقی می‌ماند.^[۹] همچنین برخی پژوهشگران به توسعه‌ی مدلی برای شبیه‌سازی سه‌بعدی الگوی جریان حول پایه‌ی پل پرداختند، به نحوی که قادر به محاسبه‌ی تغییرات سطح آب و آب‌شستگی بستر حول پایه باشند.^[۱۰]

در سال 1995 ، نیز به بررسی میدان جریان سه‌بعدی در اطراف پایه‌های پل استوانه‌یی پرداخته شد.^[۱۱] پژوهشگران در یک کانال آزمایشگاهی به بررسی الگوی جریان اطراف پایه‌ی استوانه‌یی پرداختند و با بررسی سه سری آزمایش با بسترهایی با زبری مختلف، اثر آن‌ها را در تنش برشی بستر مقایسه کردند.^[۱۲] همچنین در سال 2002 ، به بررسی میدان جریان سه‌بعدی و نقش گردابه‌ها در تشکیل حفره‌ی آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل استوانه‌یی پرداخته شد.^[۱۳] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی جریان در قوس 90° درجه (2010)، نیز مشاهده شد که الگوی جریان در قوس تحت تأثیر خیلی زیاد جریان ثانویه و نیروی گریز از مرکز است. همچنین در بررسی تغییرات مؤلفه‌های مختلف سرعت، خطوط جریان، تنش برشی بستر و جریان ثانویه نتیجه گرفته شد که در کانال قوسی، عدم تقارن موضعی مؤلفه‌های سرعت، ناشی از جریان ثانویه است.^[۱۴] و نیز در پژوهشی در رابطه با بررسی الگوی جریان حول پایه‌ی پل با طوق در حالت بستر متحرک (2012)،^[۱۵] چگونگی تأثیر طوق در گردابه‌های نعل اسبی اطراف پایه و اثر آن در آب‌شستگی گزارش شده است.^[۱۵] بررسی الگوی جریان زوج پایه‌ی استوانه‌یی عمودی در یک کانال مستقیم، دو حالت بستر متحرک و بستر صلب نشان داد که شدت سرعت و تنش برشی در ناحیه‌ی بین پایه، شدید می‌یابد و طول اثرگذاری پایه در گردابه‌های نعل اسبی بیشتر می‌شود.^[۱۶] برخی پژوهشگران نیز در یک کانال آزمایشگاهی با استفاده از سرعت‌سنج ADV به مطالعه‌ی الگوی جریان پرداختند و پایه‌ی مورد استفاده در آزمایش آن‌ها به صورت جفت و در صفحه‌ی موازی با جریان بود. آن‌ها پارامترهای هیدرولیک جریان را محاسبه و سپس با رسم خطوط جریان گردابه‌های نعل اسبی به وجود آمده را نشان دادند.^[۱۷]

همچنین در پژوهش دیگری (2015)، با استفاده از مدل‌سازی عددی به بررسی الگوی جریان و آب‌شستگی برای مقاطع مختلف پایه و نیز با محاسبه‌ی پارامترهایی نظیر تنش برشی بستر و خطوط جریان به تحلیل مشاهده‌های پژوهش پرداخته شد.^[۱۸] در یک کانال آزمایشگاهی مستقیم‌شکل به عرض 80 سانتی‌متر و طول 300 سانتی‌متر (2015) نیز به بررسی اثر شکل پایه در آب‌شستگی پرداخته و همچنین با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج ADV، الگوی جریان اطراف پایه بررسی شد.^[۱۹] در بررسی الگوی جریان، تغییرات سرعت، و توزیع تنش برشی در یک کانال با قوس 180° درجه‌ی تند و شعاع انحنا مرکزی 2 و عرض 1 متر نیز نشان داده شد که بیشینه‌ی تلاطم انرژی جنبشی در مقطع 85 درجه و کمینه‌ی مقدار آن

۳. نتایج

برداشت منحنی سرعت در قوس نوام با پایه ی پل و با بستر صلب، بیانگر الگوی جریان در ابتدای تشکیل پدیده ی فرسایش است که تجزیه و تحلیل آن می تواند در پیش بینی تغییرات بستر مؤثر باشد. در شکل ۳، نمونه یی از پروفیل های عرضی الگوی

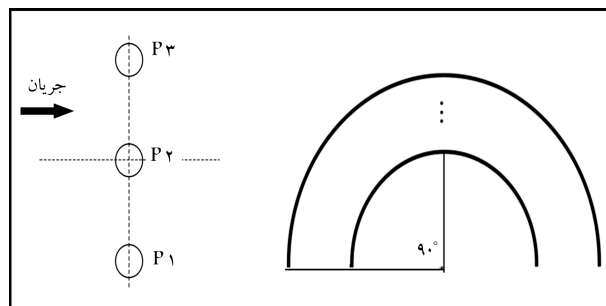


شکل ۳. نمایش الگوی جریان در مقاطع عرضی.

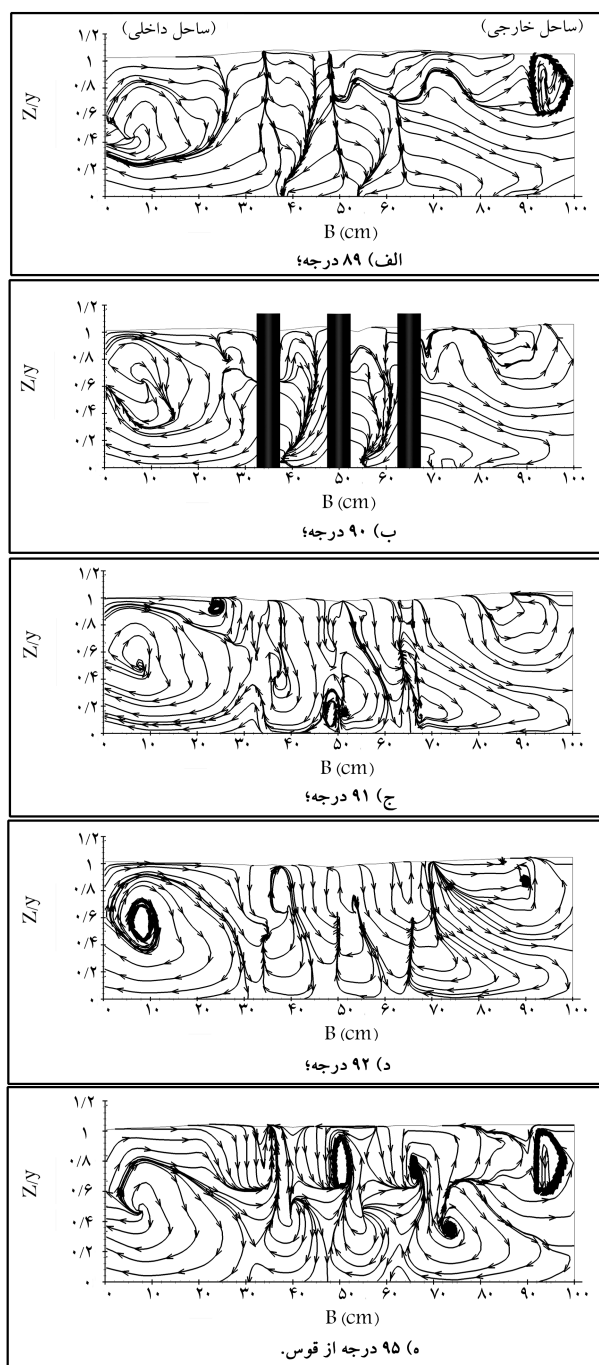
۱/۱۴ چسبانده شد. [۲۶] طبق توصیه ی برخی پژوهشگران پیشین، برای جلوگیری از تشکیل رپیل، قطر مصالح نباید از ۷/۰ میلی متر کمتر باشد و همچنین توصیه شده است که $25 - 20 > D/d_{50}$ باشد که در آن D قطر پایه و d_{50} قطر متوسط مصالح بستر است. [۲۷] طبق توصیه ی لی و استورم (۲۰۰۹) نیز مقدار D/d_{50} نباید از ۲۵ کمتر باشد. [۲۸] در ابتدا به منظور ایجاد شرایط آستانه ی حرکت ($U/U_c = 1$)، با استفاده از رابطه ی نیل (۱۹۶۷)، عمق آب به صورت تئوری محاسبه شد و مقدار ۱۷/۷ سانتی متر به دست آمد. [۲۹] در رابطه ی نیل، U_c سرعت بحرانی، G_s چگالی مخصوص مصالح، g شتاب گرانش زمین، d_{50} قطر متوسط مصالح و y عمق جریان است. با اعمال شرایط ذکر شده در کانال، حرکت های کوچک و به صورت گروهی در مصالح بستر مشاهده شد، از این رو با سعی و خطا، عمق جریان در ابتدای قوس به ۱۸ سانتی متر تغییر داده شد. در شرایط مذکور، لرزش جزئی مصالح بستر مشاهده شد و در ادامه، آزمایش ها به عنوان شرایط نزدیک به آستانه ی حرکت در ابتدای قوس در نظر گرفته شدند. در عمق ذکر شده مقدار $U/U_c = 0.98$ به دست آمد.

$$\frac{U_c^2}{(G_s - 1)g d_{50}} = 2.5 \left(\frac{d_{50}}{y} \right)^{-0.2} \quad (1)$$

توصیه شده است برای جلوگیری از آثار زبری، عمق آب بیشتر از ۲۰ میلی متر در نظر گرفته شود. [۳۰] همچنین بهتر است مقدار y/D بزرگ تر از ۳ انتخاب شود تا عمق آب در عمق چاله ی آب شستگی اثر نگذارد. [۳۱، ۳۲] با توجه به مطالب ذکر شده و به منظور شبیه سازی و بررسی الگوی جریان در شروع فرایند آب شستگی با شرایط نزدیک به آستانه ی حرکت، پس از صلب کردن بستر، عمق آب در مسیر مستقیم بالادست ۱۸ سانتی متر در نظر گرفته شد. در این شرایط نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت بحرانی (U/U_c) در ابتدای قوس به ترتیب برابر ۰/۹۸ بوده است. همچنین عدد فرود ۲۹/۰ است. پیشنهاد شده است که نسبت قطر پایه به عرض کانال باید دست کم ۱:۶۵ باشد؛ لذا جهت مدل کردن پایه ها، سه لوله ی PVC به قطر ۵۰ میلی متر استفاده شد. [۲۷] برای حذف تأثیر دیواره های کانال در آب شستگی موضعی، طبق توصیه های چیو و ملویل، قطر پایه نباید از ۱۰٪ عرض کانال بیشتر باشد. [۳۳] همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود، پایه ها در رأس قوس و در موقعیت ۹۰ درجه به صورت عمود بر جهت جریان قرار گرفته اند. فاصله ی مرکز به مرکز پایه ها، ۱۵ سانتی متر ($s/b = 2$) و دبی جریان برای آزمایش ها، مقدار ثابت ۷۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در پژوهش حاضر، سرعت مماسی با u_θ سرعت شعاعی با u_r و سرعت عمودی با u_z نمایش داده شده است. از مهم ترین اهداف پژوهش حاضر، می توان به بررسی الگوی جریان در قوس تند به همراه گروه پایه ی سه تایی اشاره کرد، که به جهت تحلیل و پیش بینی الگوی آب شستگی، شناخت کامل از الگوی جریان ضروری است.



شکل ۲. نام گذاری و نحوه ی قرارگیری پایه ها در قوس.



شکل ۴. نمایش الگوی جریان در مقاطع عرضی.

عمق جریان از کف بستر مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۵ الف الی ۵ ج، گردابه‌های حاصل از وجود پایه‌ها مشخص هستند. همچنین مقطع ۱۶° درجه شکل ۵ د آخرین مقطعی است که در آن گردابه‌های جریان ثانویه اصلی و جریان ثانویه دوم مشاهده می‌شود و در مقطع بعد و در انتهای قوس، جریان به حالت عادی خود درآمده است.

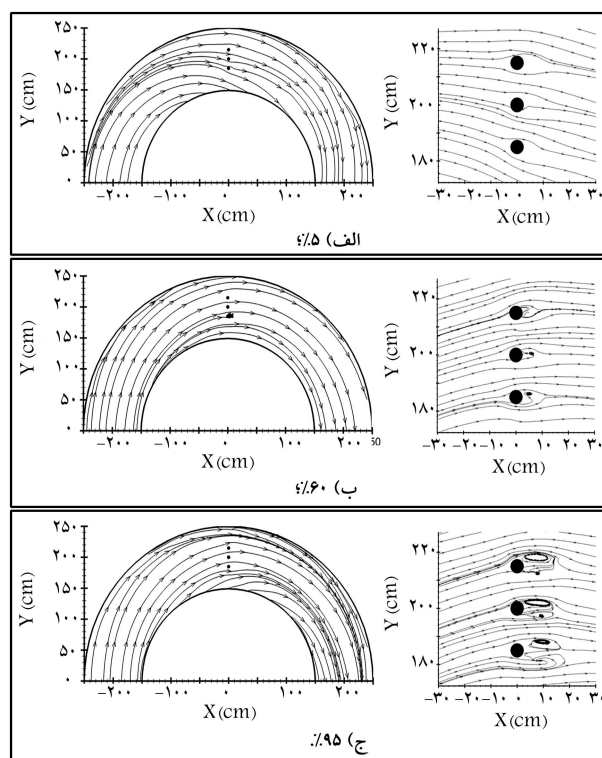
شکل ۶، نمونه‌یی از خطوط جریان در فاصله‌ی نزدیکی بستر، میانه‌ی عمق جریان، و نزدیکی سطح آب را نشان می‌دهد. مقایسه‌ی سه پلان ارائه شده با هم، بیانگر تغییر جهت خطوط جریان به طرف قوس خارجی از لایه‌های نزدیک کف

جریان در بالادست محل استقرار پایه‌ها مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشهود است، از مقاطع ابتدایی قوس جریان ثانویه شکل می‌گیرد که علت آن را چنین می‌توان بیان کرد که با ورود جریان به قوس، نیروی گریز از مرکز بر جریان اثر می‌کند و باعث اختلاف رقوم سطح آب بین ساحل خارجی و داخلی می‌شود.

در اثر پدیده‌ی ذکر شده، اختلاف فشار بین دو سمت قوس ایجاد می‌شود. در اثر اندرکنش بین نیروی گریز از مرکز و اختلاف فشار نتیجه شده از اختلاف سطح آب و مقاومت برشی بستر، جریان ثانویه در مقاطع عمود بر مسیر آب به وجود می‌آید، که در تمام موارد در شکل ۳ مشخص است. در نزدیکی سطح جریان و در مجاورت ساحل خارجی از مقطع ۴۰° درجه (شکل ۳ ب) شروع آشفتگی مربوط به یک جریان ثانویه‌ی دوم نیز مشخص است. این جریان که در مقاطع بعد کاملاً شکل‌گرفته است، به صورت پادساعت‌گرد و در خلاف جهت گردابه‌ی جریان ثانویه‌ی اصلی است. علت تشکیل جریان ثانویه‌ی دوم این است که با ورود جریان به قوس در اثر عملکرد قوس و نیروی جانب مرکز، جریان سطحی به سمت قوس خارجی رانده می‌شود و بعد از برخورد به دیوار قوس خارجی به سکون می‌رسد و سطح آب بالا می‌رود. نیروی ناشی از وزن ستون بالا افتادگی مذکور، یک نیرو به طرف پایین و در راستای مرز تقاطع آب ساکن با چرخه‌ی اصلی جریان ثانویه ایجاد می‌شود و به همین دلیل یک جریان ثانویه‌ی دوم در نزدیکی قوس خارجی شکل می‌گیرد. در شکل ۳ ج، این جریان در نزدیکی قوس خارجی و در لایه‌های سطحی جریان مشهود است. شکل ۳ و، نیز بیانگر شروع تأثیر پایه‌های پل در جریان در مقاطع ۸۸° درجه از قوس، یعنی حدود $۱/۴$ برابر قطر پایه‌ها به سمت بالادست است. با دقت در شکل مذکور، جدایی خطوط جریان از یکدیگر در فواصل معادل ۳۵° ، ۵۰° و ۶۵° درصد عرض کانال از ساحل داخلی مشهود است، که فواصل مذکور محل استقرار پایه‌ها در مقطع ۹۰° درجه از قوس هستند.

در شکل ۴، خطوط جریان در مقاطع عرضی واقع در محدوده‌ی استقرار پایه‌ها نشان داده شده است. در شکل ۴ الف، جدایی خطوط جریان از یکدیگر به دلیل وجود پایه‌ها کاملاً در فواصل مذکور قابل مشاهده است. با دقت در شکل‌های ۳ و، ۴ الف و ۴ ب مشاهده می‌شود که خطوط جریان پس از جدایی از یکدیگر به سمت بستر حمله‌ور شده‌اند. با توجه به مطالبی که در قسمت مقدمه در مورد مکانیسم تشکیل گردابه‌های نعل اسبی توضیح داده شد، دلیل حرکت این خطوط جریان به سمت بستر، مجاورت با جریان رو به پایین در نزدیکی پایه‌ها به سمت بالادست است. جریان رو به پایین ایجاد شده با برخورد به سطح بستر در شروع آزمایش، باعث ایجاد چاله‌ی آب‌سستگی و گسترش آن در عرض و طول کانال می‌شود و هر چه مقاطع به پایه‌ها نزدیک شوند، برخورد خطوط جریان به سطح بستر، محدوده‌ی بیشتری از عرض کانال را در بر می‌گیرد. با برخورد خطوط جریان با سطح بستر، جهت خطوط مذکور به سمت سواحل و به سمت سطح جریان تغییر می‌کند. این موضوع باعث ایجاد گردابه‌هایی با محوری موازی با جریان می‌شود، که در شکل‌های ۴ الف الی ۴ ه مشاهده می‌شود.

شکل ۵، نشان‌دهنده‌ی نمونه‌یی از مقاطع عرضی در پایین‌دست محل استقرار پایه‌ها تا انتهای قوس است. همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشخص است، با ورود به محدوده‌ی استقرار پایه‌ها و پس از حرکت به سمت پایین‌دست، مرکز گردابه‌ی جریان ثانویه اصلی به دلیل آشفتگی جریان پیرامون پایه‌ها به سمت ساحل داخلی حرکت کرده است. همچنین هر چه گردابه به سمت مقاطع عرضی پایین‌دست حرکت کرده است، مرکز آن به سمت سطح جریان جابه‌جا شده است، به نحوی که در بدو تشکیل و در مقطع ۲۰° درجه (شکل ۳ الف)، مرکز آن در فاصله‌یی معادل ۱۸% عمق جریان از کف بستر قرار دارد و در مقطع ۱۴۰° درجه در فاصله‌یی معادل ۶۵%

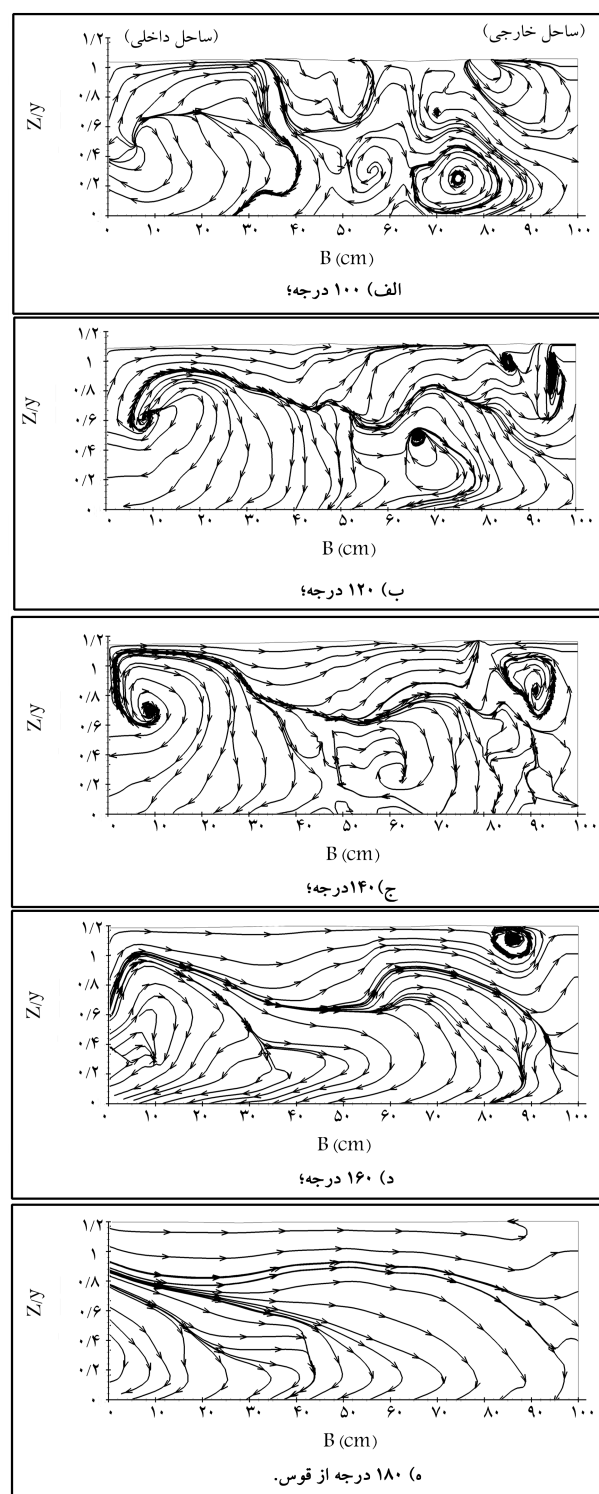


شکل ۶. نمونه‌یی از خطوط جریان در ترازهایی معادل عمق جریان از بستر کانال.

سرعت با بزرگی گردابه‌های تشکیل شده، بزرگی گردابه‌های تشکیل شده در نزدیکی سطح جریان نسبت به سطوح نزدیک بستر بیشتر است که بیانگر شکل مخروطی گردابه‌های برخاستگی است. مکانیسم تشکیل گردابه‌های مذکور، در مقدمه کاملاً توضیح داده شده است. تغییرات جهت خطوط جریان، در شکل ۷ در دو نمودار زاویه‌ی خطوط جریان با خط افقی (شکل ۷الف) و همچنین با خط عمود بر مقاطع عرضی (شکل ۷ب) بررسی شده است. این تغییرات در سه تراز معادل ۵ و ۶۰ درصد عمق جریان در ابتدای قوس از کف بستر و ۵٪ عمق جریان از سطح جریان نشان داده شده است. همچنین زوایای α ، β و θ در شکل توضیح داده شده است. همان‌طور که در شکل (۷ب) مشهود است، زاویه‌ی α خطوط جریان در تراز نزدیک بستر، مقدار منفی داشته و به سمت ساحل داخلی بوده است. همچنین در ترازهای میانی و نزدیک به سطح، مقدار زاویه‌ی α مثبت و به سمت ساحل خارجی بوده است.

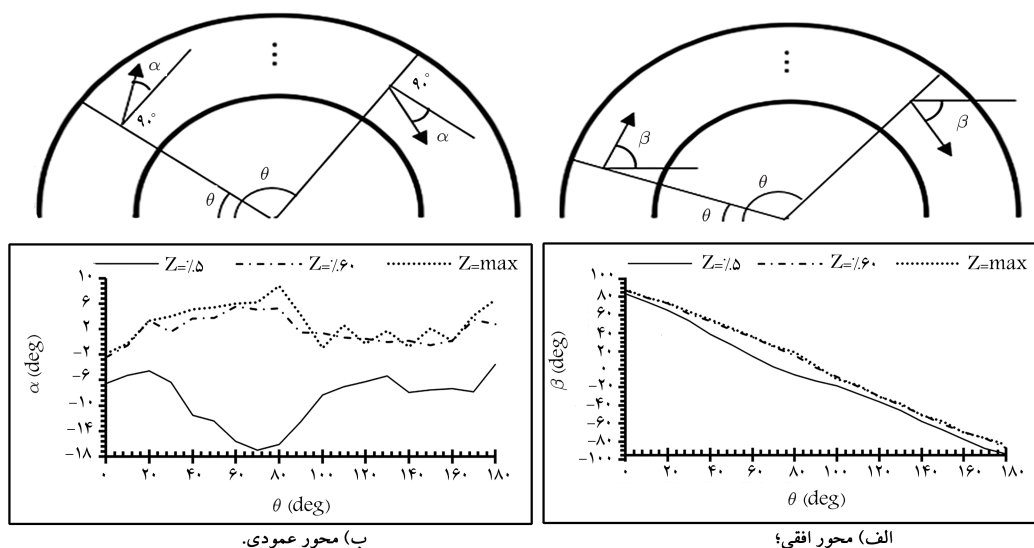
بیشینه‌ی مقدار انحراف خطوط جریان در کلیه‌ی ترازها در محدوده‌ی ۷۰ تا ۸۰ درجه از قوس حادث شده است. در تراز بیشینه از رأس قوس به سمت پایین دست به دلیل آشفتگی حاصل از استقرار پایه‌ها جهت خطوط جریان به صورت نامنظم و نوسانی در آمده است که در تراز نزدیک سطح کاملاً مشخص است. با دقت در مجاورت هر کدام از پایه‌ها به سمت پایین دست مشاهده می‌شود که اندازه‌ی سرعت منفی سرعت‌های مماسی از ترازهای نزدیک بستر تا به سطح افزایش پیدا کرده است که بیانگر شدت گرفتن گردابه‌های برخاستگی پشت پایه‌هاست. با بررسی کانتور سرعت شعاعی مشهود است که در نزدیک بستر، در بیشتر نقاط قوس، سرعت شعاعی منفی و به سمت ساحل داخلی بوده است.

اندازه‌ی منفی سرعت شعاعی بیشتر شده است که دلیل آن تأثیر قوس و توزیع بیشتر سرعت در محدوده‌ی مذکور است. نتایج آزمایشگاهی در قوس ۱۸۰ درجه نشان داد که بیشترین توزیع سرعت در زاویه‌ی ۶۰ درجه رخ داده و دلیل آن قدرت

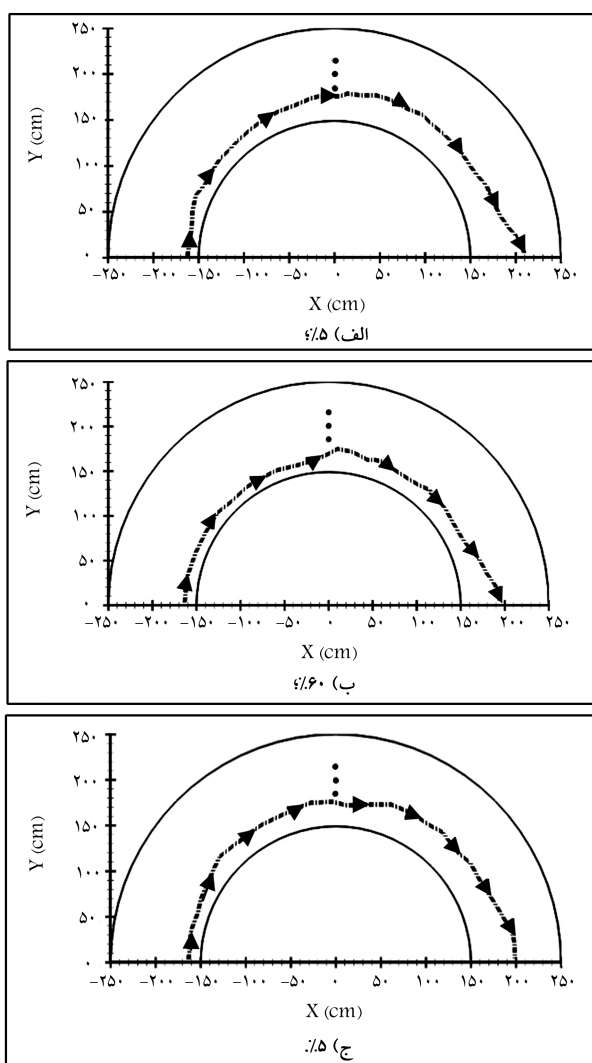


شکل ۵. نمایش الگوی جریان در مقاطع عرضی.

بستر تا لایه‌ی نزدیک سطح آب است. در ردیف سمت راست شکل ۶، در سه تراز مذکور محدوده‌ی اطراف پایه‌ها با بزرگ‌نمایی نشان داده شده است. به دلیل وجود ناحیه‌ی کم فشار پایین دست و نزدیک پایه‌ها، برگشت جریان از میانه‌ی عمق تا سطح آب و در نتیجه تشکیل گردابه‌هایی افقی با محور قائم مشاهده می‌شود. با توجه به توزیع لگاریتمی سرعت در عمق و همچنین ارتباط بزرگی مؤلفه‌های



شکل ۷. نمودار زاویه‌ی خطوط جریان بر مقطع عرضی در ترازهای مختلف.



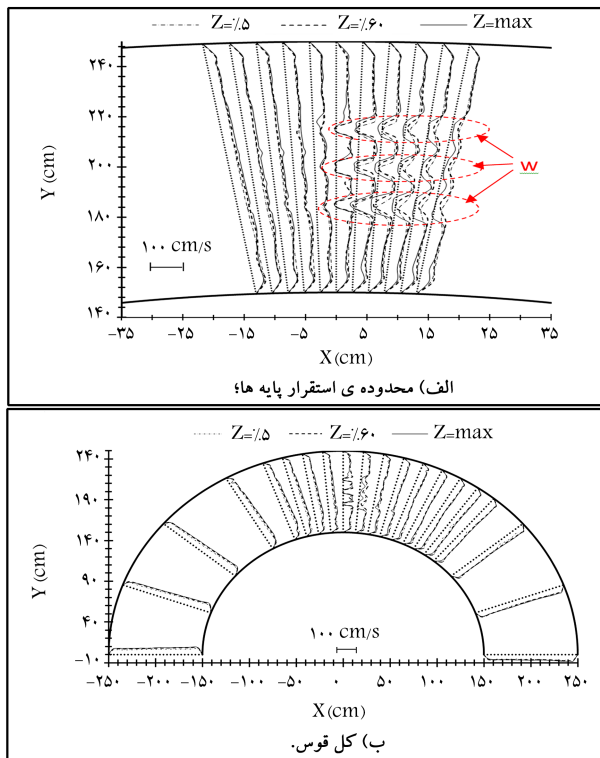
شکل ۸. نمودار سرعت مماسی (u) بیشینه در ترازهایی معادل در ابتدای قوس از کف بستر و سطح جریان.

بالای جریان ثانویه بوده است.^[۶] همچنین مطالعات پژوهشگران پیشین در قوس تند 18° درجه در مورد بیشترین مقدار ورتیسیت (میزان چرخش سلول‌ها) و تنش برشی نشان می‌دهد که در محدوده‌ی 40° تا 60° درجه رخ می‌دهد. با فاصله‌گرفتن از بستر به سمت سطح جریان، مقدار سرعت شعاعی در بیشتر نقاط قوس مثبت و به سمت ساحل خارجی بوده و این روند تا تراز نزدیک سطح جریان ادامه پیدا کرده است. در کلیه‌ی ترازها، افزایش سرعت شعاعی در محدوده‌ی استقرار پایه‌ها مشهود است.

افزایش سرعت شعاعی در تراز نزدیک سطح جریان شدت گرفته و دلیل آن افزایش سرعت مماسی نزدیک‌شونده به پایه‌ها در لایه‌های سطحی جریان بوده است، چرا که با برخورد این جریان به پایه‌ها، جدایی جریان رخ داده و سرعت مماسی به دو سرعت شعاعی و عمودی تبدیل شده است که در شکل‌های مذکور، افزایش سرعت شعاعی قابل مشاهده است. شکل ۸، نیز مسیر وقوع بیشینه‌ی سرعت در ترازهای مختلف را نشان می‌دهد.

با ورود جریان به داخل قوس و به خاطر گرادیان فشار ناشی از نیروی جانب مرکز، بیشینه‌ی سرعت در مقاطع اولیه به طرف دیواره‌ی داخلی قوس رخ داده و باعث شتاب گرفتن ذرات آب شده است. و در مقابل در نزدیکی ساحل خارجی، با گرادیان طولی مثبت همراه بوده و سرعت سیال در ناحیه‌ی مذکور کم شده است. این روند تا مقطعی بین 20° تا 30° درجه در دو تراز میانی و نزدیک به سطح شکل‌های ۸ ب و ۸ ج ادامه داشته و بعد از مقطع مذکور، بیشینه‌ی سرعت به تدریج از دیواره‌ی داخلی فاصله گرفته است. در نزدیک بستر مسیر، سرعت بیشینه‌ی سرعت تا حدود زاویه‌ی 80° درجه نزدیک ساحل داخلی قرار داشته و بعد از آن به سمت ساحل خارجی متمایل شده است. در هر سه تراز در انتهای قوس، محل وقوع سرعت بیشینه‌ی مماسی، بیشترین فاصله را از ساحل داخلی داشته است که علت آن در انتهای قوس، تأثیر گرادیان طولی فشار است که در محدوده‌ی انتهای قوس، در امتداد دیواره‌ی بیرونی گرادیان طولی منفی و در امتداد دیواره‌ی داخلی گرادیان طولی مثبت حاکم است. در نتیجه دو عامل جریان ثانویه و گرادیان طولی فشار در این حالت به عنوان عوامل هم‌سو عمل می‌کنند و سبب افزایش بیشتر سرعت در نزدیکی ساحل خارجی هستند.^[۳۴]

در شکل ۹، اندازه‌ی سرعت مماسی در سه تراز نزدیک به بستر، میانه، و نزدیک



شکل ۹. نمودار سرعت مماسی در ترازهای مختلف در محدوده‌ی استقرار پایه‌ها. است. مقدار کرل یا ورتیسیت در حالت جریان کاملاً مستقیم و غیر چرخشی، برابر صفر است.

$$w = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v_r}{\delta z} - \frac{\delta v_z}{\delta r} \right) \quad (2)$$

رابطه‌ی ۲، بیانگر چرخش یک المان به ابعاد $(\delta z \times \delta r)$ در مختصات قطبی است که در آن δv_z تغییرات سرعت در جهت z و δv_r تغییرات سرعت در جهت r است. برای هر سلول از شبکه‌ی برداشت شکل ۱۱ مانند رابطه‌ی ۳ عمل می‌شود:

$$w_\theta = \frac{1}{4} \left(\frac{U_{ri}^{j+1} + U_{ri+1}^{j+1} - U_{ri+1}^j - U_{ri}^j}{dz} - \frac{U_{zi+1}^j + U_{zi+1}^{j+1} - U_{zi}^j - U_{zi}^{j+1}}{dr} \right) \quad (3)$$

که در آن، w_θ مقدار چرخش در مقطع عرضی و حول راستای طولی و U_{ri}^j و U_{zi}^j مؤلفه‌های سرعت در راستای شعاعی و قائم در گره‌ی (i, j) هستند.

به منظور محاسبه‌ی مقدار ورتیسیت در مقطع، ابتدا مقادیر متوسط در وسط هر سلول از شبکه‌ی برداشت محاسبه و از متوسط‌گیری کل سلول‌های یک مقطع مقدار متوسط آن محاسبه و نتیجه در قالب یک نمودار در شکل ۱۲ الف ارائه شده است. دومین معیار به منظور تعیین قدرت جریان ثانویه، معیار شکری است. با انجام مطالعاتی بر روی جریان در قوس رودخانه، ضمن تشریح مکانیسم جریان ثانویه، رابطه‌ی ۴ برای قدرت جریان ثانویه معرفی شده است [۵].

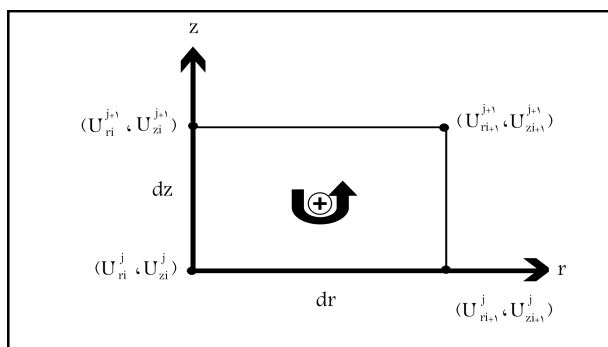
$$S_{xy} = \frac{k_{lateral}}{k_{main}} \quad (4)$$

معیار شکری در یک مقطع عرضی معین عبارت است از نسبت انرژی جنبشی جریان جانبی ($K_{lateral}$) به انرژی جنبشی جریان اصلی (K_{main}) و از طریق

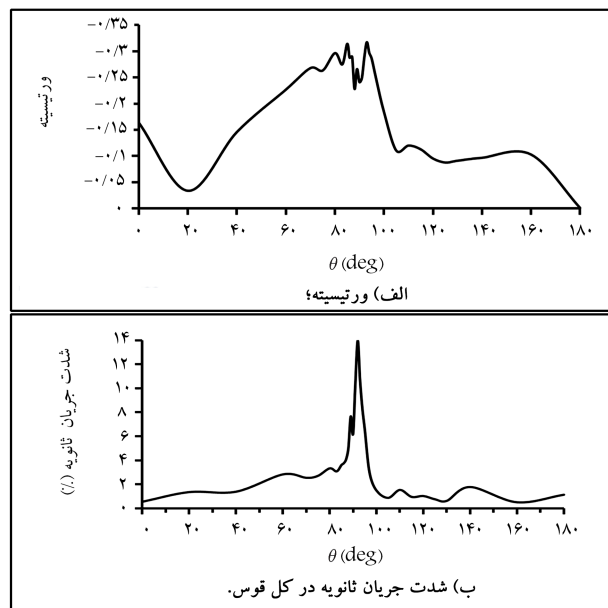
به سطح جریان درکل قوس شکل ۹ ب و در محدوده‌ی استقرار پایه‌ها شکل ۹ الف نشان داده شده است. تأثیر پایه‌ها در کانال بیشتر به صورت موضعی، یعنی در همان محدوده‌ی استقرار پایه‌ها بوده است. به همین دلیل محدوده‌ی استقرار پایه‌ها از ۸۵ تا ۹۵ درجه نشان داده شده است. در مقاطع ابتدا و انتهای قوس، منحنی‌های سرعت از یک روند مشابه در ترازهای مختلف پیروی می‌کنند و فقط اندازه‌ی سرعت در ترازهای نزدیک به سطح بیشتر از ترازهای زیرین خود بوده است شکل ۹ ب، ولی در محدوده‌ی استقرار پایه‌ها این روند تفاوت داشته است و همان‌طور که در شکل ۹ الف مشخص است، هر چه از بالادست به سمت محل استقرار پایه‌ها نزدیک شده است، از اندازه‌ی سرعت مماسی در تمام ترازها و در مقابل پایه‌ها کاسته شده است.

مقدار کاهش سرعت مماسی در تراز نزدیک به سطح به بیشتر بودن سرعت در ترازهای سطحی و در نتیجه‌ی جریان برگشتی و همچنین فاصله‌ی جدایی خطوط جریان از پایه‌ها، در تراز مذکور بیشتر از ترازهای زیرین بوده است. به همین دلیل مقدار کاهش سرعت در ترازهای سطحی در مقابل پایه‌ها بیشتر از ترازهای زیرین خود بوده است. در پایین دست محل استقرار پایه‌ها نیز قسمت‌هایی که با حرف w مشخص شده است، در اصل محل تشکیل گردابه‌های برخاستگی بوده است، چرا که با توجه به شکل ۹ الف در محدوده‌های ذکر شده، سرعت منفی مماسی وجود دارد و با مجاورت این سرعت با سرعت مثبت، جریان اصلی گردابه‌هایی در این محل‌ها تشکیل شده و قبلاً در شکل ۶ ج نشان داده شده است. همچنین روند مذکور از زاویه‌ی ۹۱ تا ۹۳ درجه در محورهای طولی گذرنده از محل استقرار پایه‌ها وجود دارد و با فاصله گرفتن از پایه‌ها به سمت پایین دست و در فاصله‌ی حدود ۳/۵ برابر قطر پایه‌ها به سمت پایین دست محل استقرار آن‌ها (زاویه‌ی ۹۵ درجه از قوس) اثر این گردابه‌ها و سرعت‌های منفی بسیار کم شده و تقریباً از بین رفته است. با توجه به اینکه پایه‌ها در فواصلی معادل ۳۵، ۵۰ و ۶۵ درصد عرض کانال از ساحل داخلی مستقر هستند، لذا در شکل ۱۰ مقاطع طولی نزدیک به این فواصل بررسی شده است.

از آنجایی که مقاطع طولی حاصل سرعت مماسی و عمودی هستند، با توجه به بیشتر بودن قابل ملاحظه‌ی سرعت مماسی نسبت به عمودی، در نتیجه خطوط جریان در نزدیک سواحل در مقاطع با فاصله‌ی زیاد نسبت به پایه‌ها به صورت موازی و لایه‌بندی شده است. با نزدیک شدن به محدوده‌ی استقرار پایه‌ها از سمت ساحل داخلی، در فاصله‌ی معادل ۲۸٪ عرض کانال از ساحل داخلی، اولین آشفتگی‌ها مربوط به پایه‌ی P۱ در شکل ۲ مشاهده شد که با خط‌چین مشخص شده است. در نتیجه، ناحیه‌ی اثرگذاری پایه‌ها در عرض کانال در فاصله‌ی معادل ۱/۴ قطر پایه‌ها به سمت ساحل داخلی قرار دارد. با حرکت به سمت ساحل خارجی در مقطع طولی گذرنده از پایه‌ی P۱ ناحیه‌ی برگشت خطوط جریان در پایین دست پایه مشخص است که عامل ایجاد گردابه‌های برخاستگی بوده و در شکل مشخص شده است. در مورد شکل‌های ۱۰ ج الی ۱۰ و نیز که مربوط به مقاطع گذرنده از پایه‌های P۲ و P۳ هستند، ناحیه‌ی برگشتی مذکور در این شکل، نشان داده شده است. با توجه به اینکه جریان تأثیرگذار در قوس‌ها، جریان ثانویه است و اندرکش این جریان با جریان طولی باعث ایجاد جریان حلزونی در قوس که عامل اصلی آب‌شستگی است، می‌شود؛ پس در ادامه، به بررسی پارامتر مذکور پرداخته شده است. در واقع قدرت جریان ثانویه، نشان دهنده‌ی شدت انتقال عرضی رسوب‌هاست. لذا به منظور پیش‌بینی الگوی آب‌شستگی، که هدف اصلی آزمایش‌های الگوی جریان است، به محاسبه‌ی مقدار جریان ثانویه در طول قوس پرداخته شده است. به منظور تعیین قدرت جریان ثانویه، معیارهای مختلفی وجود دارد، که در ادامه بررسی شده است. اولین معیار، معیار ورتیسیت است، که کرل سرعت نیز خوانده می‌شود و در رابطه‌ی ۲ ارائه شده



شکل ۱۱. شکل شماتیک یک سلول از شبکه‌ی برداشت سرعت.



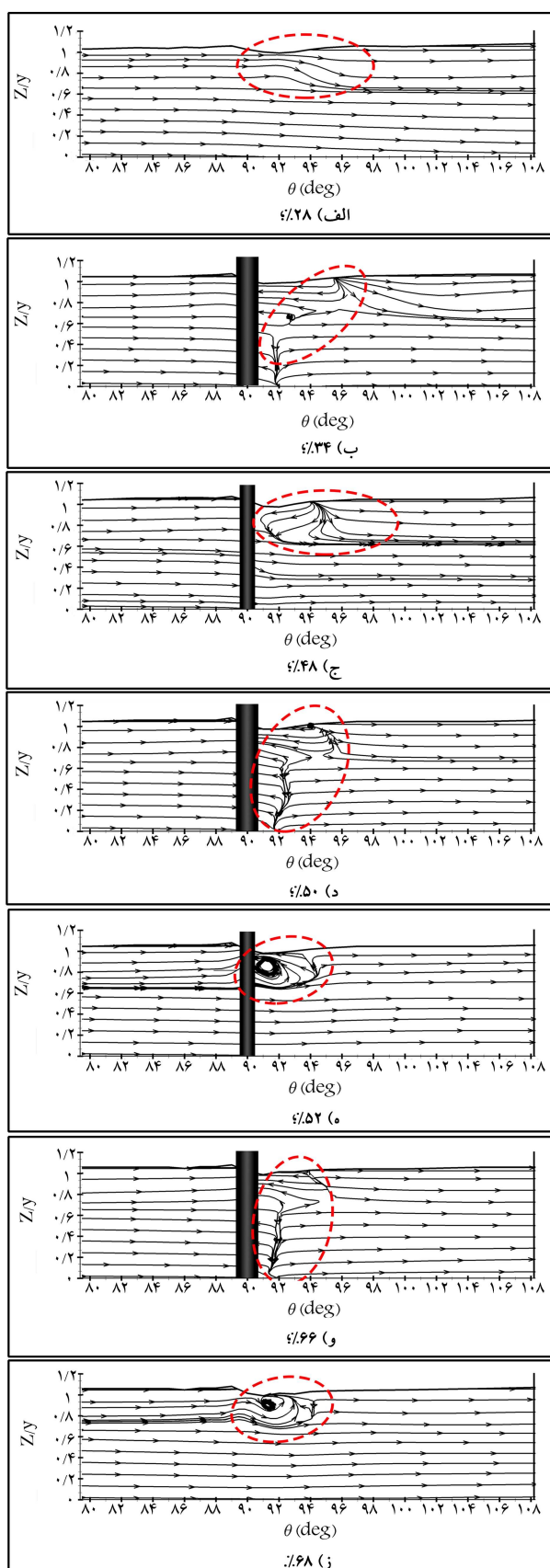
شکل ۱۲. نمودارها در کل قوس.

رابطه‌ی ۵ تعریف می‌شود:

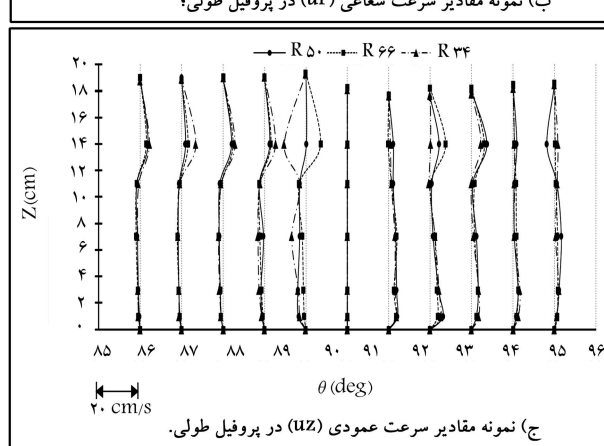
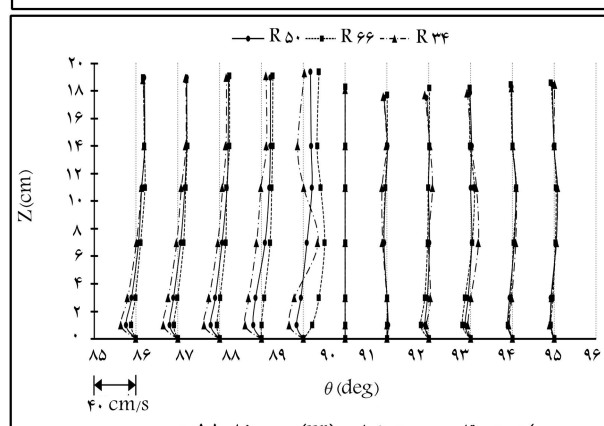
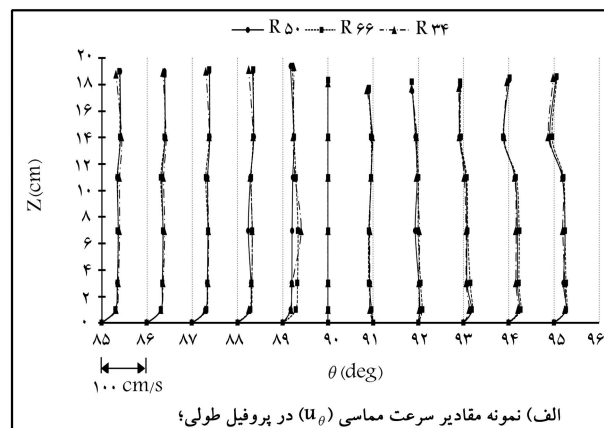
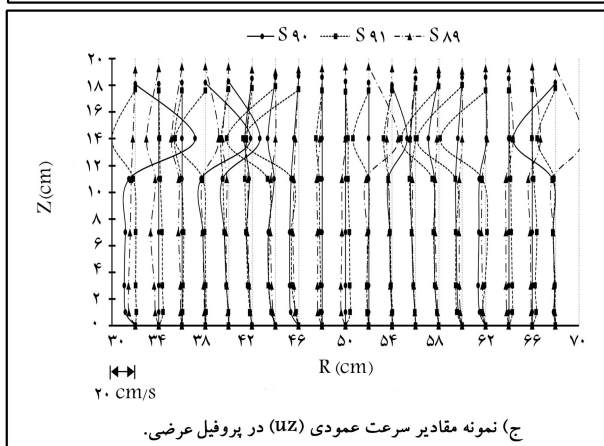
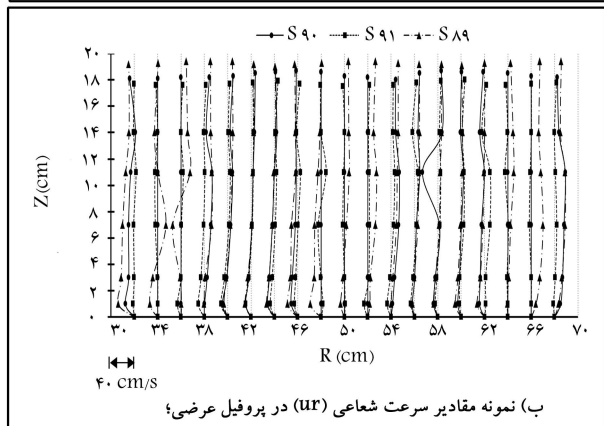
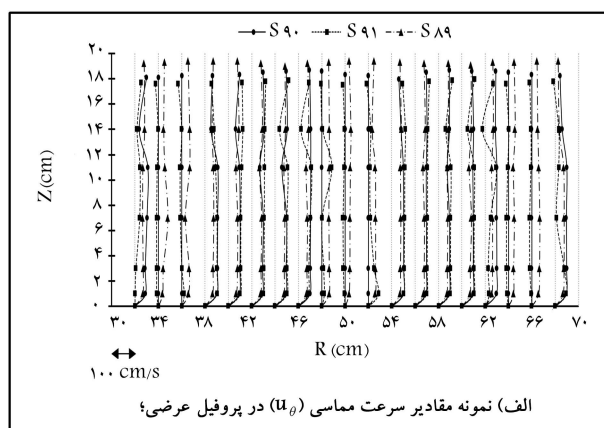
$$S_{xy} = \frac{\left(\frac{V_{xy}^2}{r_g} \right)}{\frac{V^2}{r_g}} = \left(\frac{V^2 + W^2}{U^2 + V^2 + W^2} \right) \quad (5)$$

که در آن، U ، V و W مؤلفه‌های سرعت در امتداد محورهای x ، y و z و g شتاب جاذبه هستند. توسط معیار شکری، قدرت جریان ثانویه در مقاطع عرضی محاسبه شده است که در شکل ۱۲ ب مشاهده می‌شود.

با دقت در شکل ۱۲ الف مشهود است که مقدار ورتیسیت از ابتدای قوس تا مقطع ۲۰ درجه، روندی کاهشی داشته است. پس از آن تا مقطع ۷۰ درجه، روندی افزایشی داشته و اولین قله‌ی نمودار در همین مقطع مشاهده شده است، که مربوط به نقش قوس بر روی الگوی جریان است. با توجه به آزمایش‌های پژوهشگران پیشین، بیشترین توزیع سرعت به دلیل قدرت بالای جریان ثانویه در همین محدوده اتفاق می‌افتد. [۶] با نزدیک شدن به محدوده‌ی استقرار پایه‌ها، منحنی ورتیسیت به دلیل آشفتگی‌های ناشی از حضور پایه‌ها شکل نوسانی پیدا می‌کند و در مجاورت پایه‌ها به سمت بالادست در مقطع ۸۸ درجه و پایین‌دست پایه‌ها در مقطع ۹۳ درجه بیشترین مقدار ورتیسیت مشاهده می‌شود. در نمودار قدرت جریان ثانویه شکل ۱۲ ب از همان ابتدای قوس یک روند افزایشی با شیب کم تا مقطع ۸۳ درجه مشاهده می‌شود و پس از آن به‌طور ناگهانی تا مقطع ۹۲



شکل ۱۳. نمایش الگوی جریان در مقاطع مختلف طولی قوس ۱۸۰ درجه در فاصله‌ی معادل عرض کانال از ساحل داخلی.



شکل ۱۴. نمودار مقادیر سرعت در مقاطع عرضی در زوایای ۸۹، ۹۰ و ۹۱ درجه.

شکل ۱۳. نمودار مقادیر سرعت در مقاطع طولی در فواصلی معادل ۵۰، ۳۴ و ۶۶ درصد عرض کانال از ساحل داخلی.

عرض کانال از ساحل داخلی، یعنی مقاطع گذرنده از پایه‌ها نشان داده شده است. در شکل ۱۳ الف که بیانگر سرعت مماسی در مقاطع ذکر شده است، منحنی‌ها تقریباً بر هم منطبق‌اند و فقط در زاویه ۸۹ درجه، مقداری اختلاف مشاهده می‌شود. بدین صورت که سرعت مماسی در مقطع گذرنده از پایه ۲ (در میانه‌ی عرض کانال)، مقدار کمتری داشته است. این امر نشان می‌دهد که در میانه‌ی کانال به دلیل تمرکز آشفتگی‌ها، تأثیر پایه در جریان مؤثر نزدیک‌شونده بیشتر بوده اثر مذکور در پایه‌ی نزدیک به ساحل داخلی (P۱) کمتر از دو پایه‌ی دیگر بوده است، که در شکل نیز مشخص است. با حرکت به سمت محل پایین‌دست استقرار پایه‌ها، مقادیر منفی سرعت مماسی (u_θ) مشاهده می‌شود که قبلاً در نمودارهای مربوط به کانتور سرعت مماسی و همچنین شکل ۱۲ به آن اشاره شده است، این

درجه افزایش پیدا کرده و به بیشینه‌ی مقدار خود رسیده است. پس از محل بیشینه تا مقطع ۱۰۵ درجه، به‌طور ناگهانی قدرت جریان ثانویه کاهش پیدا کرده و از این مقطع تا به انتهای قوس در یک محدوده‌ی ۲ درصدی، منحنی به‌صورت نوسانی بوده است. دلیل وجود بیشینه‌ی مقدار قدرت جریان ثانویه در نزدیکی رأس قوس، آشفتگی و گردابه‌های تشکیل شده در محدوده‌ی تنگ‌شدگی مجاور پایه‌هاست که در مقاطع عرضی بدان اشاره شد. در قسمت مقاطع طولی و عرضی فقط جهت خطوط بررسی شده است. در بخش حاضر، هر یک از سه مؤلفه‌ی سرعت u_r ، u_θ و u_z در مقاطع طولی شکل ۱۳ و عرضی شکل ۱۴ بررسی شده است. در شکل ۱۳، مقادیر سرعت در مقاطع طولی به فواصلی معادل ۵۰، ۳۴ و ۶۶ درصدی

مؤلفه‌ی قائم سرعت، در نتیجه بیشترین تغییرات u_z نیز در محدوده‌ی ذکر شده اتفاق می‌افتد.

۴. نتیجه‌گیری

تحقیقات الگوی جریان، اصولاً به منظور پیش‌بینی الگوی آب‌شستگی و تعیین نواحی بحرانی انجام می‌شود که این موارد را به‌عنوان مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر می‌توان بیان کرد:

- گردابه‌ی جریان ثانویه‌ی اصلی از 20° درجه کاملاً شکل گرفته است و تا زاویه‌ی 180° درجه از ابتدای قوس وجود دارد.
- جریان ثانویه‌ی دوم از 40° درجه تا 160° درجه مشاهده شد.
- بیشترین قدرت جریان ثانویه در زاویه‌ی 92° درجه، یعنی در محدوده‌ی قرارگیری پایه‌ها اندازه‌گیری شد.
- بیشترین تغییرات عمق مربوط به برخورد جریان با پایه‌ی اول و نزدیک به ساحل داخلی بوده است، که حدود $9/4\%$ عمق جریان اندازه‌گیری شد.
- قوی‌ترین و مهم‌ترین گردابه‌های ایجاد شده در زاویه‌ی 92° درجه در پایین‌دست پایه‌هاست، که از نظر ابعاد در حدود 80% مقطع عرضی را در بر می‌گیرند.
- از زاویه‌ی 90° درجه در فواصل 40° و 55° درصد عرض کانال از ساحل داخلی، خطوط جریان ناشی از جدایی جریان پایه‌های اول و دوم با یکدیگر برخورد و سپس به سمت بستر حمله می‌کنند که باعث حفر مصالح در بسترهای متحرک می‌شود. این نقاط دقیقاً در $5/0^\circ$ برابر قطر پایه‌ها به سمت ساحل خارجی از پایه‌های اول و دوم فاصله دارند.
- تقریباً در کل قوس سرعت شعاعی در نزدیکی سطح جریان به سمت ساحل خارجی و در نزدیک بستر به سمت ساحل داخلی است که بیانگر جریان ثانویه است.
- ناحیه‌ی اثرگذاری پایه‌ها بر روی جدایی خطوط جریان از یکدیگر در جهت طولی $1/4$ قطر پایه به سمت بالادست و $3/5$ برابر قطر پایه به سمت پایین‌دست و در جهت عمود بر جریان تقریباً $1/4$ برابر قطر پایه به سمت ساحل داخلی اولین پایه و 1 برابر قطر پایه به سمت ساحل خارجی پایه‌ی سوم بوده است.

سرعت‌های منفی تا مقطع 95° درجه و در نزدیک جریان مشاهده می‌شوند. اینکه با فاصله گرفتن از پایه‌ها به سمت پایین‌دست، سرعت مماسی در لایه‌های زیرین مثبت شده است، ولی در لایه‌های سطحی جریان هنوز منفی است، بیانگر شکل مخروطی گردابه‌های برخاستگی و بزرگ‌تر بودن ابعاد گردابه‌ها در لایه‌های سطحی است. با دقت در شکل 13 ب که مربوط به سرعت‌های شعاعی در پروفیل طولی است، در بالادست پایه‌ها جریان ثانویه کاملاً مشخص است. چرا که در هر سه مقطع طولی، مقدار سرعت شعاعی در نزدیکی بستر منفی و در لایه‌های نزدیک به سطح آب مثبت و به سمت ساحل خارجی است. با دقت در شکل مذکور مشخص است که از موقعیت 85° تا 88° درجه، محل برخورد این منحنی‌ها با محور قائم ($u_r = 0$) به سمت سطح جریان حرکت کرده است که بیانگر جابه‌جا شدن مرکز گردابه‌ی اصلی جریان ثانویه به سمت سطح جریان با حرکت به سمت پایین‌دست است. در مقطع 89° درجه به دلیل حضور پایه‌ها، منحنی‌های سرعت شعاعی دچار آشفتگی شده‌اند که این آشفتگی در نزدیکی پایه‌ی نزدیک به ساحل داخلی بیشترین مقدار را داشته است. همچنین سرعت مماسی در مقطع گذرنده از پایه‌ی $P3$ و نزدیک ساحل خارجی در کلیه‌ی ترازها، مثبت و به سمت ساحل خارجی بوده است که در شکل مشخص است. در شکل 13 ج نیز تأثیر پایه‌ها بر روی سرعت عمودی نشان داده شده است. در شکل 14 ، هر یک از سه مؤلفه‌ی سرعت در مقاطع عرضی 89° ، 90° و 91° درجه نشان داده شده است. شکل 14 الف، بیانگر مقادیر سرعت مماسی در مقاطع عرضی مذکور است و همان‌طور که در قسمت پیش نیز به آن اشاره شد، در فواصل معادل 34° ، 50° و 66° درصد عرض کانال از ساحل داخلی، سرعت u_θ در پایین‌دست هر کدام از پایه‌ها و در زاویه‌ی 91° درجه، منفی و در دیگر مقاطع عرضی از قوس مثبت و هم‌جهت با جریان اصلی بوده است. در شکل 14 ب، تغییرات سرعت شعاعی در عرض به‌خوبی نشان داده شده است. نقاط برخورد منحنی‌های این نمودار با محور قائم، بیانگر وجود گردابه‌های عرضی در نقاط برخورد است. به‌عنوان نمونه تعدادی از گردابه‌های مذکور، که در قسمت مقاطع عرضی در شکل‌های 3 الی 5 نیز مشاهده می‌شود، بر روی شکل 14 ب و در مورد مقطع عرضی 91° درجه مشخص شده است. همچون شکل 13 ج، در شکل 14 ج نیز تغییرات مربوط به سرعت عمودی (u_z) این بار در سه مقطع عرضی مذکور مشاهده می‌شود که مطابق آن، بیشترین تغییرات این سرعت در محدوده‌ی ترازهای سطحی جریان اتفاق افتاده است، چرا که در ترازهای مذکور به دلیل بیشتر بودن سرعت مماسی، با برخورد به پایه‌ها و تبدیل شدن u_θ به

منابع (References)

1. Johnson, P.A. and dock, D.A. "Probabilistic bridge scour estimates", *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, **124**(7), pp. 750-754 (1998).
2. Zarrati, A. and Azizi, M. "Control of scouring around bridge piers", *Publication of Technical College, Tehran University*, **35**(1). pp. 21-33 (2001).
3. Raudkivi, A.J. and Ettema, R. "Clear-water scour at cylindrical piers", *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, **109**(3), pp. 338-350 (1983).
4. Raudkivi, A.J. "Loose boundary hydraulics", CRC Press, Netherland (1998).
5. Shukry, A. "Flow around bends", *American Society of Civil Engineers*, **69**, pp. 734-739 (1950).
6. Ippen A.T. and Drinker, P.A. "Boundary shear stress in curved trapezoidal channels", *Journal of Hydraulic Division*, **88**(5), pp. 143-188 (1962).
7. Ian Y. and Mc Corquada, J.A. "Simulation of curved open channel flows by 3D hydrodynamic model", *Journal*

- of Hydraulic Engineering (ASCE)*, **124**(7), pp.687-698 (1998).
8. Melville, B.W and Raudkivi, R.J. "Flow characteristics in local scour at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, **112**(8), pp. 373-380 (1977).
9. Anwar, H. "Turbulent structure in a river bend", *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, **112**(8), pp.657-669 (1987).
10. Olsen, N.R.B. and Melaaen, M.C. "Three dimensional calculation of scour around cylinders", *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, **119**(9), pp. 1048-1053 (1993).
11. Dey, S. "Three-dimensional vortex flow field around a circular cylinder in a quasi-equilibrium scour hole", *Proceedings of Indian Academic of Sciences (Sadhana)*, **20**(6), pp. 771-785 (1995).
12. Ahmed, F. and Rajaratnam, N. "Flow around bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, **124**(3), pp. 288-300 (1998).
13. Graf, W.H. and Istiarto, I. "Flow pattern in the scour hole around cylinder", *Journal of Hydraulic Research*, **40**(1), pp. 13-20 (2002).
14. Naji Abhari, M., Ghodsian, M., Vaghefi, M. and et al. "Experimental and numerical simulation of flow in a 90 degree bend", *Flow Measurement and Instrumentation*, **21**(3), pp. 292-298 (2010).
15. Kumar, A., Umesh C., Kothiyari, K.G. and et al. "Flow structure and scour around circular compound bridge piers - A review", *Journal of Hydro-environment Research*, **6**(4), pp. 261-265 (2012).
16. Ataie-Ashtiani, B. and Aslani-Kordkandi, A. "Flow field around side-by-side piers with and without a scour hole", *European Journal of Mechanics B/Fluids*, **36**, pp. 152-166 (2012).
17. Day, S., Das, R. and Mazumdar, A. "Circulation characteristics of horseshoe vortex in scour region around circular piers", *Water Science and Engineering*, **6**(1), pp. 69-77 (2013).
18. Tang, X. and Donald W. "The lateral distribution of depth-averaged velocity in a channel flow bend", *Journal of Hydro-environment Research*, **10**(4), pp. 532-541 (2015).
19. Ismael, A., Gunal, M., and Hussein, H. "Effect of bridge pier position on scour reduction according to flow direction", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **40**(6), pp. 1579-1590 (2015).
20. Vaghefi, M., Akbari M. and Fiouz A. "Experimental study of turbulence kinetic energy and velocity fluctuation distributions in a 180 degree sharp bend", 10th International Congress on Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran (2015).
21. Vaghefi, M., Ghodsian, M. and Salimi, S. "Scour formation due to laterally inclined circular pier", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **41**(4), pp. 1311-1318 (2015).
22. Vaghefi, M., Sedighi, F., Moosai, M. and et al. "Experimental investigation on time duration effect of bed topography on twin convergent bridge piers at 180 degree steep bend", *Modares Civil Engineering Journal*, **16**(5), pp. 231-242 (In persian) (2016).
23. Vaghefi, M., Akbari M. and Fiouz, A.R. "An experimental study of mean and turbulent flow in a 180 degree sharp open channel bend: Secondary flow and bed shear stress", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **20**(4), pp. 1582-1593 (2016).
24. Ben Mohammad Khajeh, SH., Vaghefi, M. and Mahmoudi, A. "The scour pattern around an inclined cylindrical pier in a sharp 180-degree bend an experimental study", *International Journal of River Basin Management*, **15**(2), pp. 207-218 (2016).
25. Khaje Noori, L. "Investigation of flow turbulent structure around bridge piers", Thesis MSc., Shiraz University, Faculty of Agriculture Water Engineering Group (In Persian) (2007).
26. Dey, S., Bose, S.K. and Sastry, G.L.N. "Clear water scour at circular piers: A model", *Journal of Hydraulic Engineering*, **121**(12), pp. 869-876 (1995).
27. Raudkivi, A.J. and Ettema, R. "Clear-water scour at cylindrical piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, **125**(1), pp. 59-66 (1983).
28. Lee, S. and Sturm, T. "Effect of sediment size Scaling on physical modeling of bridge pier scour", *Journal of Hydraulic Engineering*, **135**(10), pp. 793-802 (2009).
29. Neill, C. "Mean-velocity criterion for scour of coarse uniform bed-material", Presented at the 12th Congress of the International Association for Hydraulics Research, Colorado, U.S.A. (1967).
30. Oliveto, C. and Hager, W. "Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour", *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**(9), pp. 811-820 (2002).
31. Melville, W. "Pier and abutment scour: integrated approach", *Journal of Hydraulic Engineering*, **123**(2), pp. 125-136 (1997).
32. Chiew, Y. "Mechanics of riprap failure at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, **121**(9), pp. 635-643 (1995).
33. Chiew, Y.M. and Melville, B.W. "Local scour around bridge piers", *Journal of Hydraulic Research*, **25**(1), pp. 15-26 (1987).
34. Safari Zadeh Gandeshamin, A. "Simulation of flow pattern in lateral intake from 180 degree bend", Thesis MSc., Tarbiat Modares University (In Persian) (2004).