

الگوی جریان در بالادست کوله پل در بستر فرسایش پذیر

سید سجاد کلانتری^۱، امیر رضا زراتی^۲

چکیده

در این مقاله، الگوی جریان در یک تنگ شدگی، به واسطه ساخت کوله‌های پل مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور در فلومی به عرض ۷۳/۵ سانتیمتر با بستر فرسایش پذیر تنگ شدگی یک پل با ساخت کوله‌های آن ایجاد شده و پس از برقراری جریان و به تعادل رسیدن حفره آبشستگی الگوی جریان برداشت شده است. این آزمایش‌ها با یک دبی ثابت و دو عمق پایاب متفاوت انجام شده است.

بدین منظور در شبکه نقاط بالادست محور تنگ شدگی سرعت جریان به صورت همزمان در سه جهت x, y, z توسط دستگاه ADV، اندازه‌گیری و بر اساس تغییرات سرعت‌های لحظه‌ای، شدت آشفتگی جریان نیز محاسبه شده است. بر مبنای اندازه و جهت بردارهای سرعت در شبکه نقاط اندازه‌گیری شده و همچنین مولفه‌های شدت آشفتگی جریان در سه جهت x, y, z ، تحقیق حاضر به تجزیه و تحلیل الگوی جریان در بالادست تنگ شدگی در بستر فرسایش پذیر می‌پردازد.

کلمات کلیدی

جریان رو به پایین - گرداب نعل اسبی - جریان چرخشی ثانویه - حفره آبشستگی - شدت آشفتگی - کوله

Flow pattern upstream of a constriction in an erodible channel

S.Kalantari; A.R.Zarrati

ABSTRACT

In the present paper flow pattern at a constriction in an open channel is studied experimentally. A constriction as a model of bridge site is constructed in a flume 73.5 cm wide and with erodible bed. Measurements were carried out after the scour hole was reached to its equilibrium condition. Tests were conducted with one flow discharge and two tail waters. Flow velocity was measured in 3 directions simultaneously with an ADV. Based on instantaneous velocities, turbulence intensity was also calculated and analyzed. The effect of constriction on flow pattern was then studied based on velocity and turbulence measurements in x, y and z directions.

KEYWORDS

constriction - erodible bed - turbulence intensity - flow pattern - abutment - downflow

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران (مهندسی آب)، دانشگاه صنعتی امیر کبیر Email: sskalantari@aut.ac.ir

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیر کبیر Email: zarrati@aut.ac.ir



با توجه به این آزمایش‌ها، وجود گردابه‌های نعل‌اسبی که تحت‌تأثیر جریان روبه پایین شکل گرفته‌اند، تشخیص داده شد. [۴]

در سال ۲۰۰۶ Day و Barbhuiya در ادامه تحقیقاتشان به تحلیل جریان در مجاورت دیوار هدایت باله‌ای (یکی از انواع کوله‌ها) پرداختند. نتیجه حاصل در بستر فرسایش پذیر نشان می‌داد که در وجه بالادستی کوله جریان رو به پایین شکل می‌گیرد و در ناحیه $z < 0$ (تراز پایین تر از کف بستر) در لبه حفره‌ی آبشستگی، جریان بازگشتی پدید می‌آید و جهت مولفه سرعت جریان بازگشتی در امتداد محور فلوم عکس جهت مولفه سرعت جریان اصلی است و گردابه نعل‌اسبی از این جریان بازگشتی شکل می‌گیرد. [۵]

نتایج بدست آمده از تحقیقات Day و Barbhuiya، تنها به تشکیل گردابه اشاره دارد و در مورد راستای چرخش این گردابه، ابعاد و محل تشکیل آن مطلبی بیان نشده است. همچنین در مورد شکل‌گیری جریان‌های چرخشی دیگر بجز گردابه نعل‌اسبی در تحقیقات گذشته بحثی نشده است. از آنجا که شناخت مشخصات جریان‌های چرخشی در بالادست کوله می‌تواند در تشخیص موقعیت، ابعاد و شکل آبشستگی مجاور کوله موثر باشد، لذا مقاله حاضر به تحلیل ساز و کار تشکیل، راستای چرخش و ابعاد جریان‌های چرخشی در بالادست کوله پرداخته است. بدین‌منظور یک مدل آزمایشگاهی برای تعیین الگوی جریان طراحی گردید.

۲- طرح مدل

بر روی یک فلوم مستطیلی با عرض ۷۳/۵ سانتیمتر و طول ۱۰ متر دو کوله در دوطرف به دیواره های فلوم متصل شد. طول کوله‌ها عمود بر راستای جریان معادل ۱۵ سانتیمتر (نسبت بازشدگی ۰/۵۸۹) و عرض آنها (در امتداد راستای جریان) ۷ سانتیمتر بود. محققین آزمایشات فراوانی را برای نسبت‌های باز شدگی بین ۰/۲۵ و ۰/۸۷ انجام داده‌اند [۶]، که نسبت بازشدگی ۰/۵۸۹، میانگین حداقل و حداکثر نسبت‌های بازشدگی مطالعه شده توسط محققین نامبرده است. عرض کوله‌ها نیز، بر مبنای عرض جاده عبوری از روی پل و در نظر گرفتن یک مقیاس فرضی برای مدل، انتخاب شد. برای اندازه‌گیری دبی عبوری از فلوم از سرریز مستطیلی لبه تیز استفاده شد و عمق آب در پایین دست فلوم با استفاده از لیمینتر اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری سرعت جریان در سه جهت X,Y,Z به طور همزمان، از حسگر صوتی ADV استفاده شد. با استفاده از این

مطالعات انجام شده بر روی شکست ۳۸۳ پل در ایالات متحده نشان می‌دهد که در ۲۵ درصد آنها تخریب پایه و در ۷۲ درصد تخریب کوله، علت شکست پل بوده است [۱].

از آنجا که آبشستگی مجاور کوله، سبب تخریب کوله می‌شود، لذا محققان از سال ۱۹۸۸ با روشهای مختلف به دنبال بررسی آبشستگی موضعی در مجاورت کوله بوده‌اند و بدین منظور با ابزارها و روشهای مختلف به تجزیه و تحلیل جریان در بالادست کوله پل پرداخته‌اند.

وقتی جریان آب به کوله برخورد می‌کند، سرعت جریان تبدیل به فشار روی کوله می‌گردد ($\frac{\rho u^2}{2}$). خط جریانی که در ترازهای بالا به کوله برخورد می‌کند، سرعت بیشتری نسبت به خط جریان در ترازهای پایین، دارد (تغییرات سرعت در عمق). در نتیجه فشار وارده از سطح آب به سمت کف کمتر می‌شود. گرادیان فشار، منجر به شکل‌گیری جریان رو به پایین می‌گردد. جریان قائم رو به پایین به محض برخورد با بستر فرسایش پذیر، موجب ایجاد آبشستگی می‌گردد.

هنگامیکه حفره آبشستگی تشکیل شد، جریان رو به پایین در داخل آن چرخیده و در برخورد با جریان اصلی، گردابی را تشکیل می‌دهد که به علت شبیه بودن به نعل‌اسب در پلان، به گرداب نعل‌اسبی معروف است [۲].

نتایج تحقیقات Raudkivi نیز نشان می‌دهد که، پس از برخورد جریان آب با کوله‌ها، جریانی رو به پایین و در ادامه آن جریان برگشتی، یک جریان چرخشی را پدید می‌آورد. این جریان چرخشی مشابه جریانی است که در محل خم رودخانه‌ها شکل می‌گیرد [۲].

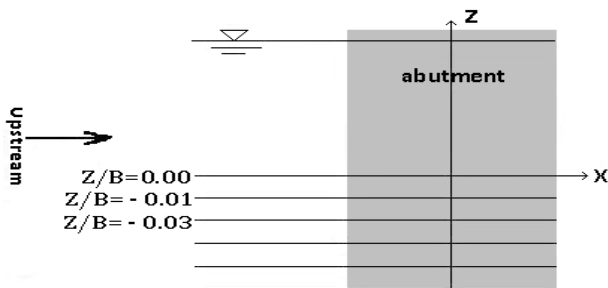
در سال ۱۹۹۴ Kwan و Melville با استفاده از روش حباب هیدروژنی، درباره الگوی سه بعدی جریان در حفره آبشستگی کنار کوله تحقیق کرده‌اند. آنها دریافتند که گردابه نعل‌اسبی به‌همراه جریان روبه پایین عامل اصلی آبشستگی در مجاورت کوله است [۲].

در سال ۲۰۰۵ Day و Barbhuiya به مطالعه جریان در مجاورت کوله‌ها پرداختند. آنها آزمایشی را بر روی فلومی با بستر فرسایش پذیر انجام دادند. در مدل آنها، نسبت عرض کوله به عمق آب کوچکتر از واحد انتخاب شد و کلیه آزمایشات بر روی یک کوله با ابعاد مشخص انجام شد. در این تحقیق برای ارزیابی شرایط دینامیکی جریان، سرعت جریان و مولفه‌های آشفتگی در سه مقطع عرضی و سه مقطع طولی با استفاده از دستگاه ADV، اندازه‌گیری شد.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (2)$$

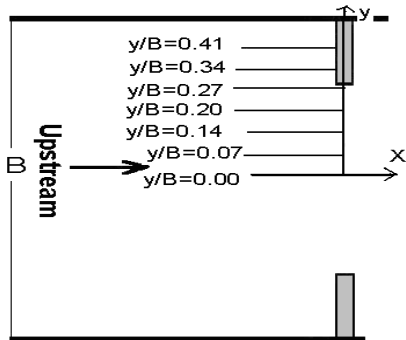
در رابطه ۲، y عمق جریان (برابر عمق پایاب) است. از آنجا که در آزمایش با پایاب ۱۰ سانتیمتر، عمق آبشستگی بزرگتر از آزمایش با پایاب ۱۵ سانتیمتر است، لذا برای تحلیل الگوی جریان در بالادست تنگ شدگی و الگوی جریان در داخل حفره آبشستگی، ابتدا برای پایاب ۱۰ سانتیمتر مشخصات جریان، در مقاطع طولی و عرضی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس، نتایج آن با پایاب ۱۵ سانتیمتر مقایسه می‌شود. در آزمایش با پایاب ۱۰ سانتیمتر با در نظر داشتن آبشستگی در نقاط مختلف، سه مقطع $z/B = 0.00, -0.01, -0.03$ در حفره آبشستگی، برای ارزیابی بردار سرعت در حفره آبشستگی انتخاب گردیده است که مقاطع یاد شده در شکل ۲، نشان داده شده است.

در اینجا B عرض فلوم است. برای امکان مقایسه نتایج بین آزمایشها با عمق های متفاوت پایاب، در تحقیق حاضر کلیه فاصله ها و عمق های آبشستگی نسبت به عرض فلوم بی بعد شده است.



شکل (۲): مقاطع اندازه‌گیری سرعت در عمق

بر اساس جانمایی نقاط اندازه‌گیری شده در شکل ۱، می‌توان ۷ مقطع طولی در بالادست تنگ شدگی در نظر گرفت که پنج مقطع آن در بالادست دهانه خروجی و دو مقطع دیگر در بالادست کوله قرار دارد. فاصله این مقاطع از یکدیگر ۵ سانتیمتر است به گونه‌ای که مقطع اول منطبق بر خط مرکزین فلوم و مقطع هفتم در نزدیکی دیواره فلوم قرار گرفته است. مقاطع طولی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۳): مقاطع طولی اندازه‌گیری سرعت

دستگاه با بسامد ۲۵ هرتز، از فاصله ۵ سانتیمتر پایینتر از سطح آزاد تا ۱ سانتیمتری بستر، سرعتها در فواصل یک سانتیمتری اندازه‌گیری شد. به دلیل آنکه ADV، سرعت ۵ سانتیمتر پایین تر از کلاک خود را اندازه‌گیری می‌کند و ضمناً خود کلاک هم باید کاملاً در آب باشد در نتیجه نمی‌توان از سطح آزاد تا فاصله ۵ سانتیمتر پایین تر از آن سرعتها را برداشت نمود.

مصالح غیر چسبنده‌ای که در کف فلوم و به عنوان بستر فرسایش پذیر استفاده شد، یکنواخت انتخاب شد تا لایه مسلح شکل نگیرد.

معیار غیر یکنواختی دانه‌ها، انحراف معیار اندازه دانه‌ها است که با نماد σ_g نشان داده می‌شود و از فرمول ۱ محاسبه می‌گردد [۲]:

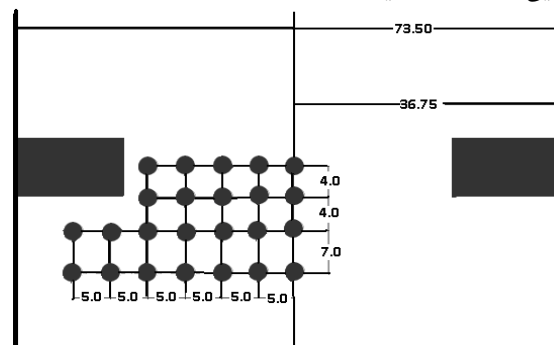
$$\sigma_g = \left(\frac{d_{84.1}}{d_{15.9}} \right)^{0.5} \quad (1)$$

در رابطه ۱، $d_{84.1}$ قطر ذره‌ای است که ۸۴٪ درصد مصالح بستر از آن ریزتر باشد و $d_{15.9}$ قطر ذره‌ای است که ۱۵٪ درصد مصالح بستر از آن ریزتر باشد. اگر $\sigma_g < 1.4$ باشد، اثر غیر یکنواختی ذرات بستر منتفی بوده و لایه مسلح تشکیل نمی‌شود. مشخصات ماسه استفاده شده به ترتیب ذیل است:

$$\sigma_g = 1.34$$

$$d_{50} = 0.95 \text{ mm}$$

جانمایی نقاط اندازه‌گیری سرعتها در شکل ۱ آمده است.



شکل (۱): جانمایی دقیق محل اندازه‌گیری ها در صفحه X-Y

واحد تمام اندازه‌ها در شکل ۱، سانتیمتر است. جدول ۱ مشخصات جریان‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد، در دو آزمایش انجام شده طول کوله (L) برابر ۱۵ سانتیمتر است و دبی جریان (Q) برابر ۱۱/۱۲ لیتر بر ثانیه تعیین شده است. دو آزمایش تنها در عمق پایاب (H_{ds}) با یکدیگر اختلاف دارد.

در جدول ۱، متغیرهای Fr , V , A ، به ترتیب سطح مقطع، سرعت میانگین و عدد فرود جریان پیش از اعمال تنگ شدگی است و عدد فرود در کانال مستطیلی از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

جدول (۱): مشخصات جریان در آزمایشات بستر فرسایش پذیر

L(cm)	15	15
Q(lit/s)	11.12	11.12
H _{ds} (cm)	10	15
A(cm ²)	735	1102.5
V (cm/s)	15.12925	10.08617
Fr	0.152751	0.101834

از آب اندازی فلوم، در بالادست تنگ شدگی نشان می‌دهد. از آنجا که مقاطع بررسی شده در عمق با تقسیم بر عرض فلوم (B) بی بعد شده است، عمق آبشستگی نیز با تقسیم بر B بی بعد شده است.

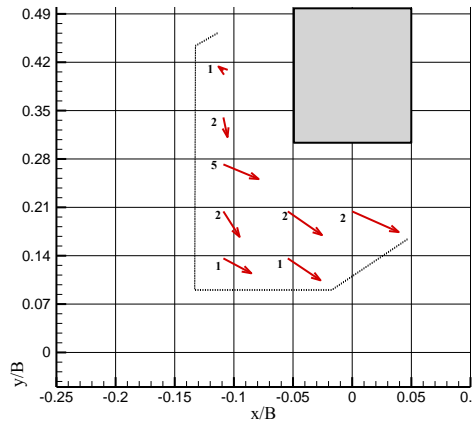
۳- بردارهای های سرعت

۳-۱- نمودار تصویر بردار سرعت در صفحه xy

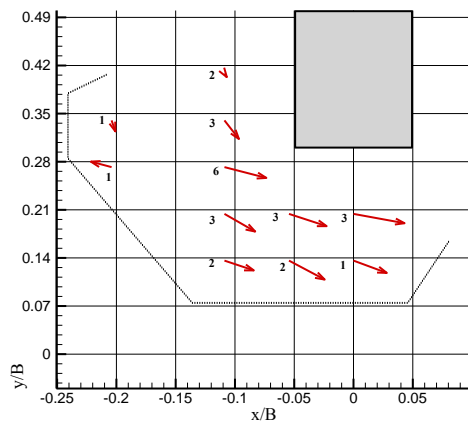
در مرحله اول بردار سرعت متشکل از دو مولفه \hat{u} و \hat{v} در این بخش بررسی می‌گردد و تغییرات بردار سرعت در مقاطع افقی نشان داده شده در شکل ۲ ارزیابی می‌شود (شکل ۶) که اندازه و راستای تصویر بردار سرعت عبارتست از:

$$\text{اندازه تصویر بردار سرعت در صفحه } XY: (\hat{u}^2 + \hat{v}^2)^{0.5}$$

راستای تصویر بردار سرعت در صفحه XY: $\arctan(\hat{v}/\hat{u})$

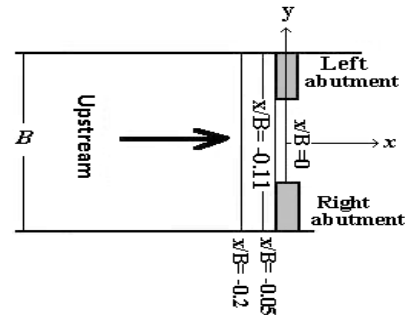


z/B = -0.02 (a)



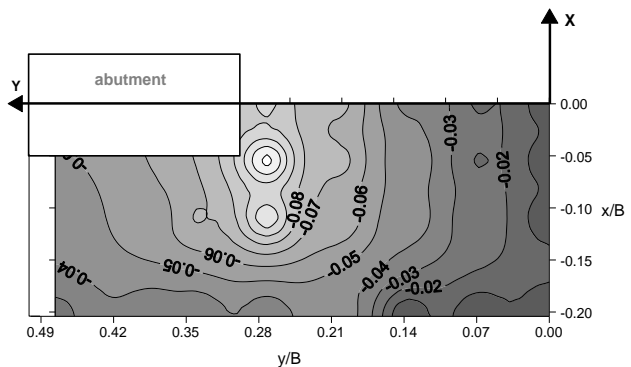
z/B = -0.01 (b)

همچنین می‌توان، چهار مقطع عرضی بالادست محور تنگ شدگی، فرض نمود که نقاط اندازه گیری شده بر روی هریک از مقاطع عرضی از یکدیگر ۵ سانتیمتر فاصله دارد، به گونه ایکه اولین مقطع منطبق بر محور تنگ شدگی است و مقاطع بعدی در بالادست محور تنگ شدگی واقع شده‌اند. این مقاطع عرضی بر روی شکل ۴، نشان داده شده است.



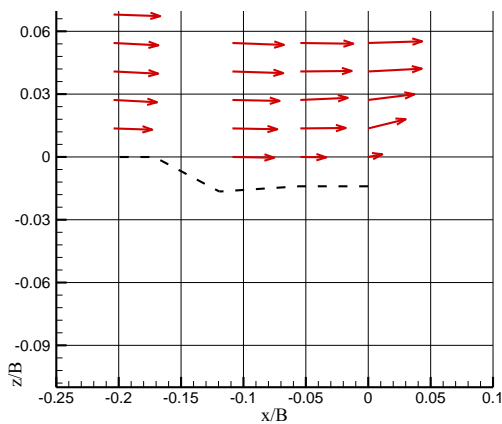
شکل (۴): مقاطع عرضی اندازه‌گیری سرعت

همانگونه که گفته شد، در اثر عبور جریان از محل تنگ شدگی، بستر دچار فرسایش می‌شود که میزان فرسایش بستر در نقاط مختلف، متفاوت است. برای داشتن دید بهتری از الگوی جریان در حفره آبشستگی، پلان آبشستگی در شکل ۵ آمده است.

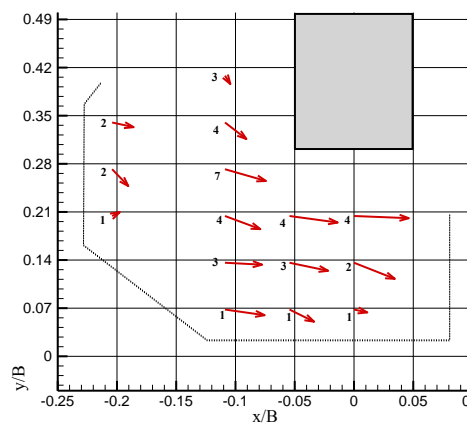


شکل (۵): پلان آبشستگی بستر برای پایاب ۱۰ سانتیمتر (اعداد، عمق آبشستگی هستند که با عرض کانال بی بعد شده اند.)

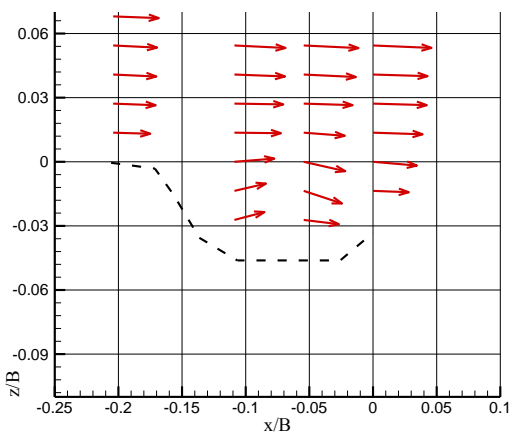
شکل ۵، خطوط هم میزان عمق آبشستگی را، ۲۴ ساعت پس



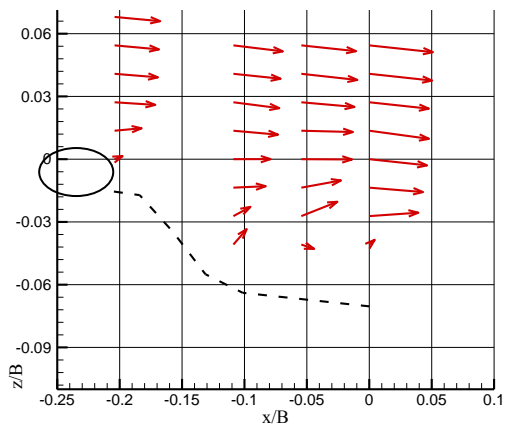
$y/B = 0.07$ (b)



$z/B = 0.00$ (c)



$y/B = 0.14$ (c)



$y/B = 0.20$ (d)

شکل (۶): نمودار تصویر بردار سرعت در صفحه xy

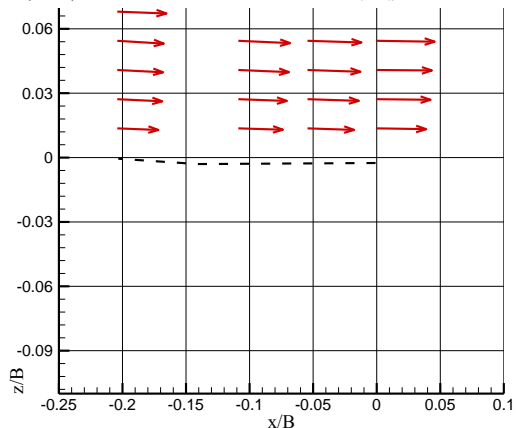
خطوط شکسته در شکل ۶، محدوده تقریبی آبشستگی را مشخص می‌سازد. اعداد کنار بردارهای سرعت در این شکل، فاصله تقریبی از کف بستر را به سانتیمتر نشان می‌دهد. در شکل ۶ (a) در نزدیکی دیواره فلوم مولفه بردار سرعت جریان در جهت x ، عکس جریان اصلی فلوم است که نشان می‌دهد جریان بازگشتی در نزدیکی بستر تشکیل می‌گردد.

۳-۲- نمودار تصویر بردار سرعت در صفحه xz

تغییرات تصویر بردار سرعت در صفحه xz (مقاطع شکل ۳) در شکل ۷، نشان داده شده است که اندازه و راستای آن مطابق روابط ذیل بدست می‌آید:

$$\text{اندازه تصویر بردار سرعت در صفحه } xz : (\hat{u}^2 + \hat{w}^2)^{0.5}$$

$$\text{راستای تصویر بردار سرعت در صفحه } xz : \arctan(\hat{w}/\hat{u})$$



$y/B = 0.0$ (a)

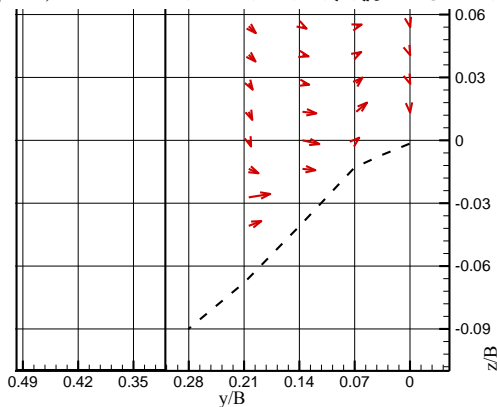
بردار سرعت، مثبت است که نشان می‌دهد جریان خروجی از حفره در برخورد با جریان اصلی دوباره به سوی کوله بر می‌گردد. در نتیجه به نظر می‌رسد در بستر فرسایش پذیر، یک گردابه نعل اسبی پایدار در داخل حفره آبشستگی تشکیل شود. ضمناً تشکیل گردابه نعل اسبی در داخل حفره آبشستگی در شکل‌های (e) و (g) نیز مشخص است.

۳-۳- نمودار تصویر بردار سرعت در صفحه yz

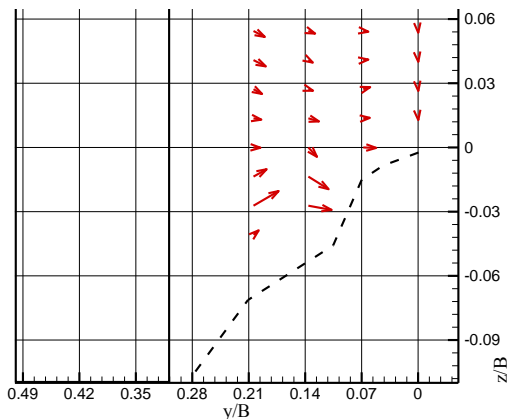
برای دیدن تغییرات بردار سرعت در عرض فلوم، نمودار تغییرات تصویر بردار سرعت در مقاطع عرضی نشان داده شده در شکل ۴ در شکل ۸ ارائه شده است که اندازه و راستای آن مطابق روابط زیر بدست می‌آید:

$$\text{اندازه تصویر بردار سرعت در صفحه } yz : (\hat{w}^2 + \hat{v}^2)^{0.5}$$

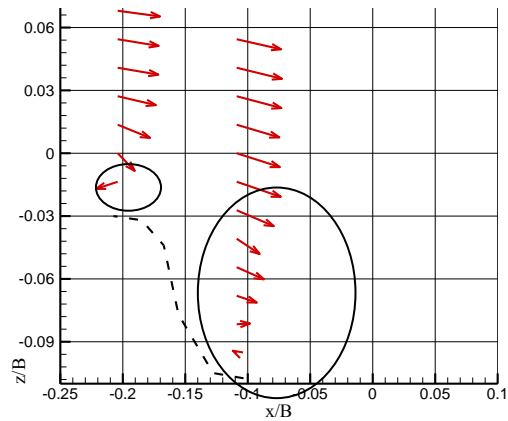
$$\text{راستای تصویر بردار سرعت در صفحه } yz : \arctan(\hat{w}/\hat{v})$$



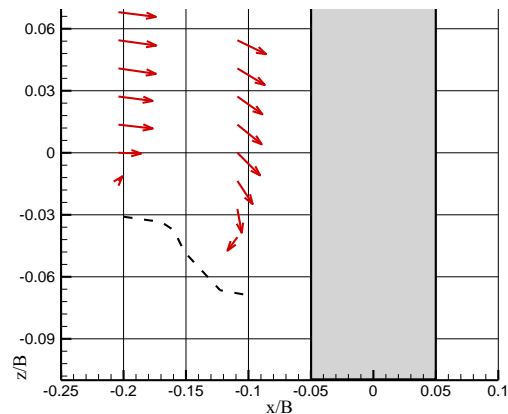
x/B = 0.0 (a)



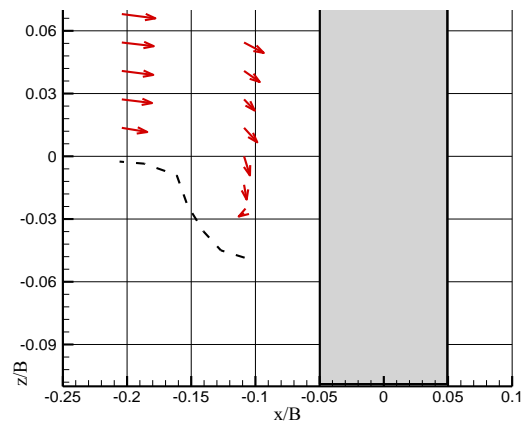
x/B = -0.05 (b)



y/B = 0.27 (e)



y/B = 0.34 (f)



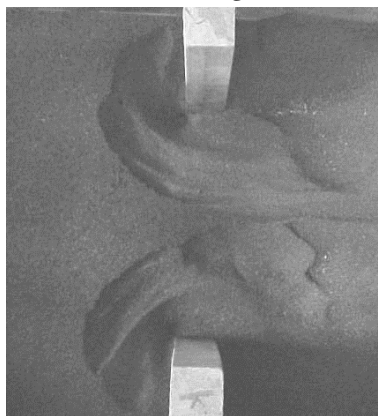
y/B = 0.41 (g)

شکل (v): تصویر بردار سرعت در صفحه xz

همانطور که در شکل‌های (e) و (f) و (g) مشخص است، به علت فاصله گرفتن از دیواره فلوم به سمت دهانه بازشدگی $(y/B = 0.27)$ ، پیوسته مولفه \hat{u} جریان اصلی، افزایش می‌یابد. افزایش \hat{u} ، منجر به افزایش گرادیان فشار روی کوله، از بالا به پایین می‌گردد، در نتیجه جریان رو به پایین قویتری شکل می‌گیرد که می‌تواند حفره آبشستگی بزرگتری را ایجاد نماید.

در شکل (f) در داخل حفره در مقطع $x/B = -0.11$ جریان بازگشتی دیده می‌شود و در مقطع $x/B = -0.2$ ، مولفه قائم

شده است، دو گردابه دیده می‌شود.



شکل (۹): تصویر لگاری آبشستگی ۲۴ ساعت پس از شروع آزمایش

با رجوع به شکل ۷ (e) نیز دو جریان گردابی مستقل از یکدیگر دیده می‌شود. بردارهای سرعت در بیضی بزرگتر نمایانگر گردابه نعل اسبی است، تلاقی جریان آب بالادست با گردابه نعل اسبی جریان چرخشی دیگری را تشکیل می‌دهد (جریان چرخشی ثانویه). از روی شکل ۹ به روشنی مشخص است که آبشستگی در دو تراز متفاوت رخ داده است. شکل پله‌ای آبشستگی، شکل گیری دو جریان چرخشی مستقل از یکدیگر را تایید می‌کند که می‌توان گفت، آبشستگی ناشی از جریان چرخشی ثانویه کمتر از گردابه نعل اسبی است.

۴- شدت آشفتگی جریان

بر اساس سرعت‌های متوسط u و v و w ، نوسانات سرعت‌ها

(u', v', w') بدست آمده و بر اساس روابط ۳ تا ۵،

تحت عنوان مولفه شدت آشفتگی بی بعد، محاسبه می‌شود:

$$u^+ = \overline{(u'^2)}^{0.5} / U \quad (3)$$

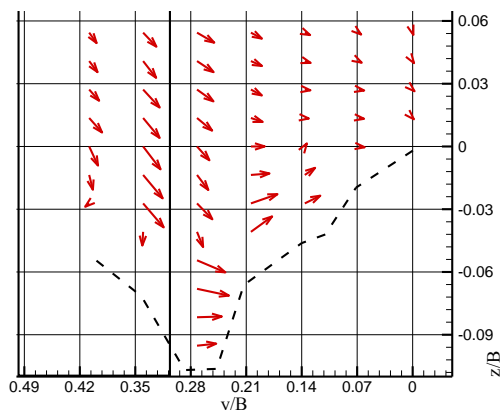
$$v^+ = \overline{(v'^2)}^{0.5} / U \quad (4)$$

$$w^+ = \overline{(w'^2)}^{0.5} / U \quad (5)$$

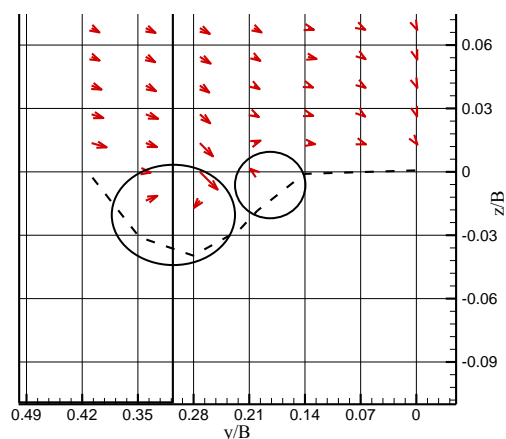
U عبارتست از سرعت میانگین جریان در بالادست فلوم که از تقسیم دبی کل بر سطح مقطع جریان حاصل می‌گردد.

نتایج حاصل از اندازه گیری شدت آشفتگی جریان پیش از قراردادن کوله‌ها نشان می‌دهد که در جریان یکنواخت، مولفه‌های شدت آشفتگی از ۵ درصد بیشتر نمی‌شود، بنابراین اگر مولفه شدت آشفتگی از ۱۰ درصد بیشتر شود، نشانه تغییرات شدید مولفه‌های سرعت جریان در اثر تغییر مسیر بدلیل وجود کوله است.

با توجه به نوسانات سرعت می‌توان فرض کرد اگر در یک نقطه، علامت حداقل ۱۰ درصد از سرعت‌های لحظه ای اندازه‌گیری شده، عکس علامت بقیه داده‌ها باشد چنین شرایطی



شکل (c) $x/B = -0.011$



(d) $x/B = -0.20$

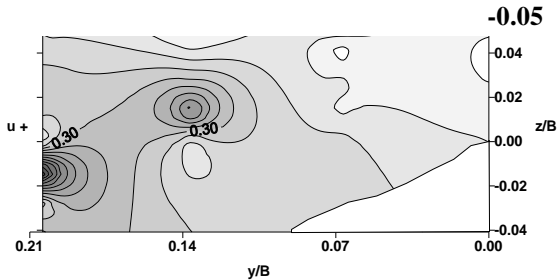
شکل (۸): تصویر بردار سرعت در صفحه yz

در شکل ۸ فاصله بین دو خط عمودی توپر، نشان دهنده محل قرارگیری کوله در عرض فلوم است.

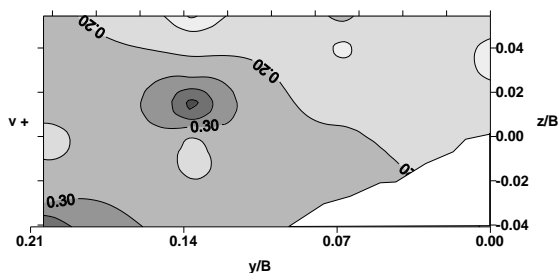
بازگشت به شکل ۷ (g) نشان می‌دهد که در محل فصل مشترک کوله و دیواره، محور گردابه‌های جریان بیشتر به سمت راستای محور y متمایل دارد. هرچه گرداب نعل اسبی از دیواره فلوم فاصله بیشتری پیدا کند، زاویه محور گردابه نعل اسبی با محور y بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر محور گردابه نعل اسبی از محل اتصال کوله به دیواره فلوم به سمت دهانه خروجی دوران می‌کند. برای نمونه، در شکل ۸ (c) در مقطع $y/B = 0.41$ ، مولفه بردار سرعت در راستای y (\hat{v}) کاهش محسوسی یافته است و نشان می‌دهد که محور گردابه بیشتر به سمت محور y متمایل است در حالیکه در همان شکل وجود \hat{v} بزرگ از مقطع طولی $y/B = 0.27$ تا $y/B = 0.07$ ، نشان می‌دهد که جریان علاوه بر چرخش، مولفه بزرگی نیز در راستای y دارد و یا به عبارتی محور چرخش المانها از امتداد y فاصله گرفته است و متمایل به محور x پیدا کرده است.

در شکل ۸ (d) در داخل محدوده ای که با بیضی مشخص

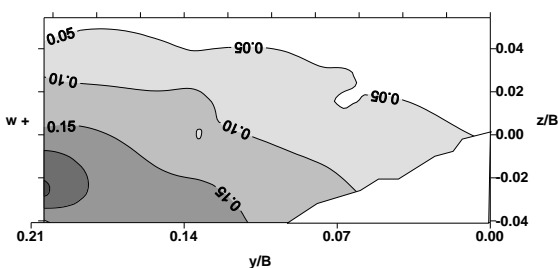
۴-۲- تغییرات مولفه های شدت آشفتگی در مقطع عرضی $x/B = -0.05$



(a)



(b)



(c)

شکل (۱۱): تغییرات شدت آشفتگی در مقطع عرضی $x/B = -0.05$

در مقطع عرضی $x/B = -0.05$ ، محور گردابه نعل اسبی، بیشتر به سمت راستای محور x متمایل است (بخش ۳-۳). از آنجا که دنباله گرداب نعل اسبی از نزدیکی مرز کوله و دهانه خروجی (پنجه کوله) می‌گذرد لذا در شکل ۱۱ (c) حداکثر شدت آشفتگی در نزدیکی پنجه کوله ($y/B > 0.14$) رخ می‌دهد.

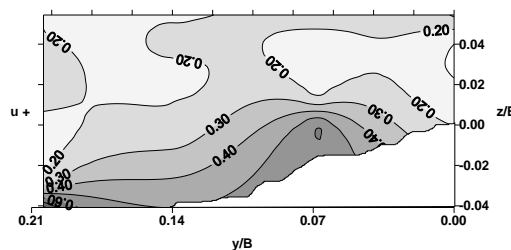
همانطور که در شکل های ۱۱ (a) و ۱۱ (b) مشخص است، در دو محدوده مستقل از هم تمرکز آشفتگی مشاهده می‌گردد که به نظر می‌رسد افزایش شدت آشفتگی در نقطه تقاطع $y/B = 0.14$ و $z/B = 0.01$ به واسطه اختلاط ناشی از برخورد جریان اصلی با جریان چرخشی ثانویه خروجی از حفره رخ داده است.

محدوده دوم تمرکز آشفتگی در داخل حفره آبشستگی در فاصله $0.14 < y/B < 0.2$ به واسطه تشکیل گردابه نعل اسبی پایدار است و در فاصله $0.07 < y/B < 0.14$ جریان ثانویه پایدار تشکیل می‌شود. از طرفی تغییرات w لحظه ای نشان می‌دهد که خارج حفره در محدوده $0.14 < y/B < 0.2$ و $0.0 < z/B < 0.03$ گردابه نعل اسبی ناپایدار و در محدوده $0.07 < y/B < 0.14$

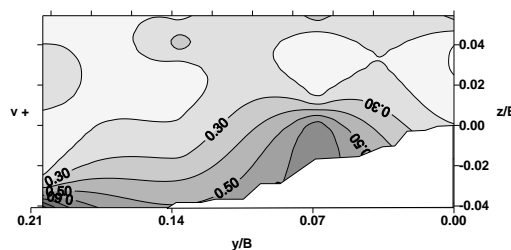
نمایانگر تشکیل یک جریان چرخشی ناپایدار (غیردائمی) است. ولی اگر در عین بالابودن شدت آشفتگی، جهت مولفه های بردار سرعت عوض نشود در چنین جریانی، شدت آشفتگی بالا نشان دهنده انتقال اندازه حرکت حاصل از تغییر موقعیت و یا ابعاد جریان های گردابی در نزدیکی کوله است.

۴-۱- تغییرات مولفه های شدت آشفتگی در مقطع عرضی

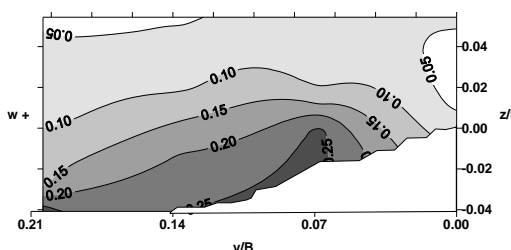
$x/B = 0.00$



(a)



(b)



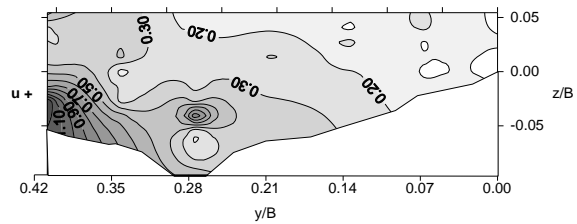
(c)

شکل (۱۰): تغییرات شدت آشفتگی در مقطع عرضی $x/B = 0.00$

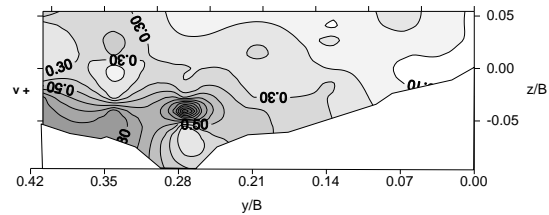
تغییر علامت w لحظه ای نشان می‌دهد که در $x/B = 0.00$ در محدوده $0.00 < z/B < 0.01$ و $0.07 < y/B < 0.14$ شدت آشفتگی بالا به واسطه جریان ثانویه ناپایدار و در $0.00 < z/B < 0.01$ و $0.14 < y/B < 0.2$ ، شدت آشفتگی بالا به واسطه گرداب نعل اسبی ناپایدار است. داخل حفره آبشستگی ($z/B < 0.00$) گرداب نعل اسبی پایدار در فاصله $0.14 < y/B < 0.2$ و جریان ثانویه پایدار در فاصله $0.07 < y/B < 0.14$ برقرار است.

$0.0 < z/B < 0.01$ ، جریان ثانویه ناپایدار برقرار است .

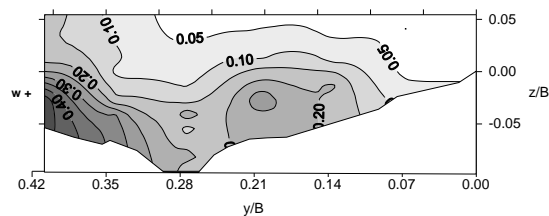
۳-۴- تغییرات مولفه های شدت آشفتگی در مقطع عرضی $x/B = -0.11$



(a)



(a)

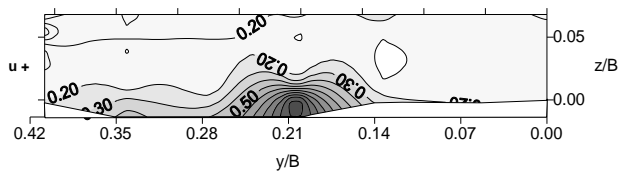


(c)

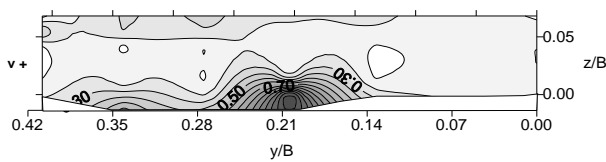
شکل (۱۲): تغییرات شدت آشفتگی در مقطع عرضی $x/B = -0.11$

آبشستگی ، در مقطع عرضی $x/B = -0.11$ ، در محدوده $0.0 < z/B < 0.05$ و $0.27 < y/B < 0.42$ شدت آشفتگی بالا تحت تاثیر گرداب نعل اسبی ناپایدار رخ داده است این در حالیکه که در خارج از حفره آبشستگی ، جریان ثانویه ناپایدار تشکیل نمی شود و شدت های آشفتگی بالاتر از ۱۰ درصد در سایر نقاط می تواند تحت تاثیر جابجایی و تغییر ابعاد جریان ثانویه و گرداب نعل اسبی ایجاد شده باشد .

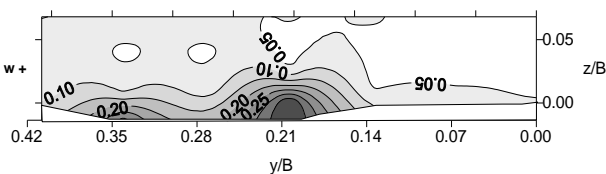
۴-۴- تغییرات مولفه های شدت آشفتگی در مقطع عرضی $x/B = -0.20$



(a)



(b)



(c)

شکل (۱۳): تغییرات شدت آشفتگی در مقطع عرضی $x/B = -0.20$

در شکل ۸ (d)، در بازه $0.14 < y/B < 0.27$ (در داخل حفره آبشستگی) ، جریان چرخشی ثانویه تشکیل می گردد و بنابراین جریان چرخشی ثانویه عامل افزایش شدت آشفتگی در محدوده گفته شده می باشد و در داخل حفره آبشستگی، در فاصله $0.27 < y/B < 0.34$ ، گردابه نعل اسبی پایدار تشکیل می شود .

تغییرات مولفه u لحظه ای در زمان اندازه گیری نشان می دهد که در محدوده $0.14 < y/B < 0.27$ و $0.0 < z/B < 0.03$ جریان چرخشی ثانویه ناپایدار عامل افزایش شدت آشفتگی است و در سایر نقاطی که شدت آشفتگی بزرگتر از ۱۰ درصد است، جابجایی و تغییر شکل گردابه نعل اسبی در فاصله $0.27 < y/B < 0.34$ و جابجایی و تغییر شکل جریان ثانویه در فاصله $0.14 < y/B < 0.27$ می تواند عامل افزایش شدت آشفتگی باشد .

در نزدیکی دیواره فلوام پس از برخورد جریان اصلی با کوله و شکل گیری جریان رو به پایین، با کف برخورد کرده و به سمت بالادست و دیواره فلوام منحرف می شود . یعنی در جریان بازگشتی مولفه بردار سرعت در امتداد محور yx ، برخلاف جریان اصلی است (شکل ۶ (a)). روبروشدن جریان بازگشتی در محدوده یادشده و جریان اصلی، منجر به افزایش قابل ملاحظه مولفه های شدت آشفتگی می گردد به گونه ای که در شکل ۱۲ (a) کمیت مولفه u^+ به عدد ۱ هم می رسد .

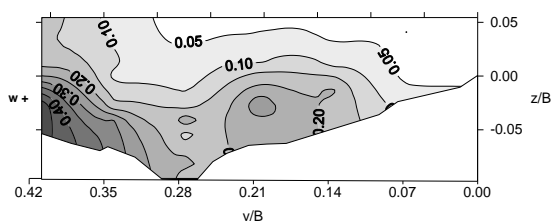
همانطور که در شکل ۱۲ (c) مشخص است ، داخل حفره آبشستگی در دو محدوده جدا از هم تمرکز تنش دیده می شود که در محدوده اول (فاصله $0.27 < y/B < 0.42$) به واسطه تشکیل گرداب نعل اسبی پایدار و در محدوده دوم (فاصله $0.14 < y/B < 0.27$) به واسطه جریان چرخشی ثانویه شدت آشفتگی بالا رفته است . با مراجعه به شکل ۹ نیز مشخص می گردد که مقطع $x/B = -0.11$ ، هر دو تراس آبشستگی را قطع کرده است .

تغییرات u لحظه ای نشان می دهد که در بیرون حفره

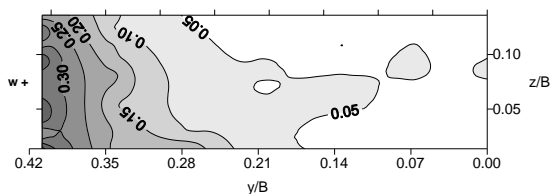
۵- تغییرات الگوی جریان در اثر افزایش پایاب

مطابق جدول ۱، تفاوت دو آزمایش، تغییر در عمق پایاب است، در آزمایش اول، پایاب ۱۰ سانتیمتر و در آزمایش دوم ۱۵ سانتیمتر می‌باشد.

چون در گرداب نعل اسبی همواره w یکی از مولفه‌های اصلی جریان می‌باشد از میان سه مولفه شدت آشفتگی بررسی w^+ به عنوان ملاک تغییرات شدت آشفتگی مورد توجه قرار گرفته است. در پایاب ۱۵ سانتیمتر، عمق آبستگی در اطراف کوله به مراتب از پایاب ۱۰ سانتیمتر کمتر بوده است.



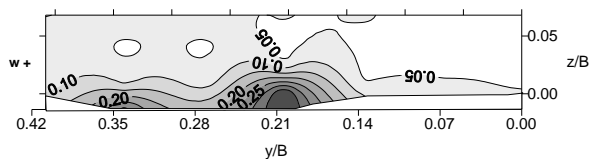
(a) پایاب ۱۰ سانتیمتر



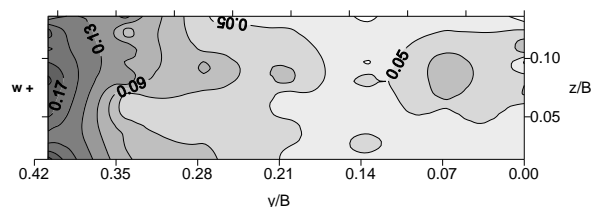
(b) پایاب ۱۵ سانتیمتر

شکل (۱۵): مقایسه مولفه قائم شدت آشفتگی در $x/B = -0.11$ در اثر تغییر پایاب

از آنجا که سرعت جریان بالادست کوله در اثر افزایش عمق پایاب، کاهش می‌یابد، پس با افزایش پایاب از قدرت جریان رو به پایین که مولد گرداب نعل اسبی است کاسته می‌شود. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که پیرو آن، جریان ثانویه نیز بسیار ضعیف می‌شود. برای عمق پایاب ۱۰ سانتیمتر، از آنجا که جریان چرخشی ثانویه در بالادست گرداب نعل اسبی شکل می‌گیرد، لذا در شکل (a) دنباله آن از فاصله $0.14 < y/B < 0.2$ در بالادست دهانه خروجی عبور می‌کند که افزایش شدت آشفتگی در آن محدوده ناشی از جریان چرخشی ثانویه پایدار است. در حالیکه پایین بودن شدت آشفتگی‌ها در فاصله $0.14 < y/B < 0.2$ در شکل (b) نشانه تشکیل نشدن و یا قدرت بسیار کم جریان چرخشی ثانویه در پایاب ۱۵ سانتیمتر است. تراس دوم آبستگی نیز در پایاب ۱۵ سانتیمتر دیده نشده است.

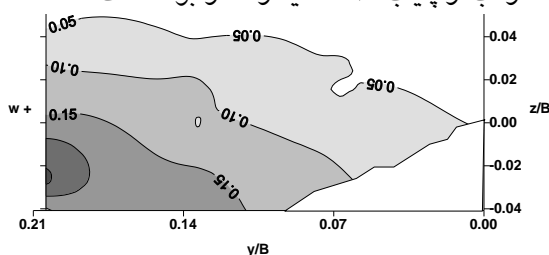


(a) پایاب ۱۰ سانتیمتر

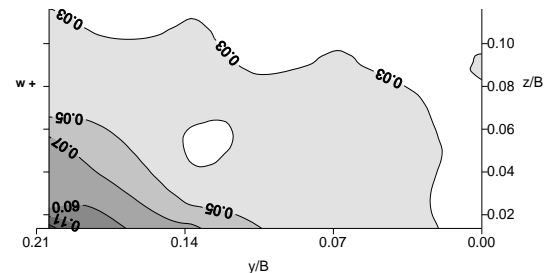


(b) پایاب ۱۵ سانتیمتر

شکل (۱۶): مقایسه مولفه قائم شدت آشفتگی در $x/B = -0.20$ در اثر تغییر پایاب



(a) پایاب ۱۰ سانتیمتر



(b) پایاب ۱۵ سانتیمتر

شکل (۱۴): مقایسه تغییرات مولفه قائم شدت آشفتگی در مقطع عرضی $x/B = -0.05$ به ازای تغییر پایاب

همانگونه که در شکل دیده می‌شود در پایاب ۱۰ سانتیمتر، شدت آشفتگی در فاصله $0.07 < y/B < 0.20$ و تا عمق $z/B = 0.02B$ بالای ۱۰ درصد است در صورتیکه در پایاب ۱۵ سانتیمتر محدوده جریان با شدت آشفتگی بالا بسیار محدودتر شده است که این نشان دهنده محدودتر شدن گرداب نعل اسبی به گوشه بین پنجه کوله و کف فلوم است.

باید توجه داشت که با افزایش پایاب، سرعت جریان کاهش یافته و به همین دلیل سرعت جریان رو به پایین که مولد گرداب نعل اسبی است نیز کاهش می‌یابد. بدین ترتیب آبستگی و ابعاد گرداب نعل اسبی کم می‌شود.

۷- با افزایش پایاب، سرعت جریان کاهش یافته و به همین دلیل سرعت جریان رو به پایین که مولد گرداب نعل اسبی است کاهش می‌یابد. بدین ترتیب از محدوده تشکیل گرداب نعل اسبی و میزان عمق آبشستگی کاسته می‌شود.

۷- مراجع

- [۱] Richardson E V, Harrison L J, Richardson J R, Davies S R 1993 'Evaluating scour at bridges.' Publ. FHWA-IP-90-017, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington, DC.
- [۲] Raudkivi, A.J., 1990 "Loose Boundary hydraulics", Pergamon Press, Oxford
- [۳] Kwan T F, Melville B W 1994 'Local scour and flow measurements at bridge abutments.' J. Hydraul. Res. 32: 661-673.
- [۴] S.Dey and A.K.Barbhuiya, December 2005 "Flow Field at a Vertical-Wall Abutment" Journal of Hydraulic Engineering, pp.1126-1135.
- [۵] S.Dey and A.K.Barbhuiya, 2006 "3D flow field in a scour hole at a wing-wall abutment" Journal of Hydraulic Research, Vol.44, No.1, pp. 33-50.
- [۶] Molinas, A. and Marcus, K.B. "Choking in Water Supply Structures and Open Channels". Journal of Hydraulics Research, Vol.36(4), 1998, pp675-694.

به نظر می‌رسد اختلاف زیاد عمق آبشستگی در پایاب ۱۵ سانتیمتر و پایاب ۱۰ سانتیمتر، سبب شده است که الگوی آشفستگی برای این دو پایاب متفاوت باشد.

بررسی مولفه u لحظه‌ای نشان می‌دهد که در شکل ۱۶ (a) در فاصله $0.34 < y/B < 0.41$ که کمیت شدت آشفستگی بزرگتر از ۱۰ درصد است، شدت آشفستگی بالا ناشی از تشکیل گردابه نعل اسبی ناپایدار در نزدیکی دیواره فلوم است. در پایاب ۱۵ سانتیمتر حفره آبشستگی بسیار کوچک بوده و در اندازه گیری‌ها جریان چرخشی ثانویه دیده نمی‌شود ولی در پایاب ۱۰ سانتیمتر در داخل حفره آبشستگی افزایش شدت آشفستگی در فاصله $0.14 < y/B < 0.27$ به واسطه تشکیل جریان چرخشی ثانویه پایدار و در فاصله $0.27 < y/B < 0.34$ به واسطه تشکیل گردابه نعل اسبی پایدار می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

- ۱- نمودار بردارهای سرعت نشان می‌دهد که در بالادست تنگ شدگی یک گردابه نعل اسبی پایدار در داخل حفره آبشستگی تشکیل می‌شود.
- ۲- برای پایاب ۱۰ سانتیمتر از روی شدت آشفستگی‌ها و تحلیل سرعت‌های لحظه‌ای برداشت شده می‌توان گفت که ابعاد گرداب نعل اسبی پایدار در جهت Z برابر عمق حفره آبشستگی است و در جهت Y از دیواره فلوم تا محور تنگ شدگی گردابه نعل اسبی تشکیل می‌شود.
- ۳- محور چرخش گرداب نعل اسبی در نزدیکی دیواره فلوم به سمت راستای محور Y متمایل دارد و با حرکت به سمت محور فلوم تغییر جهت داده و از محور Y فاصله می‌گیرد به نحوی که محور چرخش گرداب نعل اسبی از پنجه کوله تا محور تنگ شدگی بیشتر به سمت راستای محور X متمایل است.
- ۴- رویارویی جریان اصلی با گرداب نعل اسبی با توجه به قدرت آن سبب شکل‌گیری جریان چرخشی ثانویه بالادست گرداب نعل اسبی در نزدیکی بستر می‌گردد. این جریان چرخشی از بالادست کوله به سمت دهانه خروجی هدایت می‌شود. به نظر می‌رسد جریان چرخشی ثانویه در حرکت از بالادست به سمت دهانه خروجی، در بالادست آبشستگی ناشی از گرداب نعل اسبی، تراس دوم آبشستگی را ایجاد می‌کند.
- ۵- شدت آشفستگی بالا در بعضی مقاطع تا ۵۰٪ نشان دهنده انتقال ممنتوم شدید در مقطع تنگ شده می‌باشد.
- ۶- از بررسی شدت آشفستگی می‌توان محدوده تشکیل گردابه‌های نعل اسبی و ثانویه پایدار و ناپایدار را در مقاطع مختلف اطراف کوله را تخمین زد.

