

«یادداشت تحقیقاتی»

مطالعه عددی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس 90 درجه با بستر تعادل یافته

محمد واقفی^{1*}، ولی‌اله محسنی مهر²، سیدشاکر هاشمی³

1- استادیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

2- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

3- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

* بوشهر، دواس، کد پستی 7516913817

vaghefi@pgu.ac.ir

چکیده- در این مقاله به بررسی عددی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس 90 درجه با بستر متحرک با استفاده از نرم‌افزار SSIIM پرداخته شده است. کانال مورد مطالعه یک کانال 90 درجه و با شعاع انحنای مرکزی 2/4 متر می‌باشد که یک آبشکن T شکل و با نسبت طول بال به جان معادل 1 در موقعیت 45 درجه از ساحل خارجی (برای تعیین الگوی جریان) قرار گرفته است و برای تعیین الگوی آبشستگی نسبت طول بال به جان آبشکن متفاوت و از 0/25 تا 1/25 برابر در نظر گرفته شد. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار SSIIM¹ با داده‌های آزمایشگاهی نشان دهنده مطابقت مطلوب بود. تغییرات نیمرخ عرضی بستر ناشی از اثر طول بال به جان آبشکن، تغییرات عمق آبشستگی بیشینه و همچنین مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان در مقاطع مختلف مقایسه شد. نتایج نشان داد که مقدار آبشستگی برای نسبت طول بال به جان معادل 1/25، کمترین مقدار را دارد و محدوده تغییرات عمق آبشستگی بیشینه بین 1/29 تا 1/42 برابر عمق جریان در بالادست می‌باشد. همچنین مشاهده شده که در پایین‌دست آبشکن دو گردابه که جهت یکی از آن‌ها ساعتگرد و دیگری پادساعتگرد است، به وجود می‌آید.

کلیدواژگان: الگوی جریان، آبشکن T شکل، قوس 90 درجه، SSIIM.

1- مقدمه

توپوگرافی بستر و عمق جریان از طرف دیگر، باعث تشکیل جریان‌های پیچیده در قوس رودخانه‌ها می‌شود.

مسیر رودخانه‌ها در طبیعت معمولاً بصورت پیچانرودی است. طبیعت سه بعدی جریان و آشفتگی‌های موجود در قوس رودخانه‌ها از یک طرف و تغییرات غیر یکنواخت

1. Sediment Simulation In Intakes with Multiblock Option

نزدیک بستر به سمت جداره داخلی و در تراز نزدیک سطح آب به سمت جداره خارجی متمایل می‌شوند. همچنین محل وقوع حداکثر سرعت طولی در ابتدای قوس، در نیمه داخلی مقطع و سپس به سمت دیواره خارجی کانال جابجا می‌شود. واقفی و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان و آبستگي پیرامون آبشکن T شکل منفرد و مستقر در قوس 90 درجه تحت تاثیر پارامترهای مختلف از جمله عدد فرود، شعاع انحنا، موقعیت استقرار آبشکن، توپوگرافی بستر، طول بال و جان آبشکن پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که محل حداکثر عمق آبستگي و در فاصله 10 تا 20 درصد طول آبشکن در بالادست آبشکن می‌باشد. همچنین آن‌ها مشاهده نمودند که افزایش طول آبشکن، کاهش طول بال آبشکن، افزایش عدد فرود و تغییر موقعیت آبشکن به سمت پایین‌دست قوس باعث افزایش ابعاد چاله آبستگي می‌شود (واقفی و همکاران، 1387 و 1388؛ واقفی و قدسیان، 1389؛ Vaghefi et al., 2009, 2012). هدف از این تحقیق شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و آبستگي اطراف آبشکن T شکل مستقر در قوس 90 درجه با بستر تعادل یافته با استفاده از نرم‌افزار SSIIM می‌باشد.

2- معادلات حاکم بر محاسبات میدان جریان

مدل عددی SSIIM برای بدست آوردن سرعت جریان آب، معادلات رینولدز را بر روی یک شبکه سه بعدی غیر متعامد با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ حل می‌کند. معادله رینولدز برای یک سیال غیر قابل تراکم و با چگالی ثابت به صورت رابطه (1) بیان می‌شود (Olsen, 2004).

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial X_j} (-P \delta_{ij} - \rho \overline{U_i U_j}) \quad (1)$$

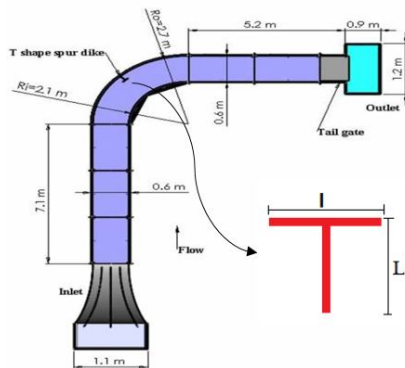
X_1 ، X_2 و X_3 فاصله در سه جهت، U_1 ، U_2 و U_3 سرعت‌های سه بعدی جریان در سه جهت، P فشار، ρ جرم مخصوص

این جریان‌ها تأثیر زیادی بر کف قوس رودخانه می‌گذارد، بطوریکه سرعت بالای جریان در قوس خارجی باعث فرسایش بستر رودخانه و ساحل خارجی و در نتیجه تخریب آن می‌شود. کارایی اصلی آبشکن‌های رودخانه‌ای، انحراف جریان از کناره رودخانه و هدایت آن به سمت مجرای اصلی است. نتیجه انحراف جریان، توسعه یک ناحیه چرخشی با تلاطم شدید در پیرامون آبشکن است که به صورت گسترده‌تری در پایین‌دست آبشکن ظاهر می‌شود (معاونت برنامه‌ریزی، 1388). با استقرار آبشکن در قوس خارجی رودخانه، به دلیل اندرکنش بین الگوی جریان در قوس و الگوی جریان حول آبشکن، تحلیل جریان در اطراف آبشکن‌های مورد استفاده در قوس از پیچیدگی بیشتری برخوردار است (واقفی و همکاران، 1387). در مورد الگوی جریان و آبستگي پیرامون آبشکن مستقر در رودخانه‌ها تحقیقات عددی و آزمایشگاهی متعددی انجام گرفته است.

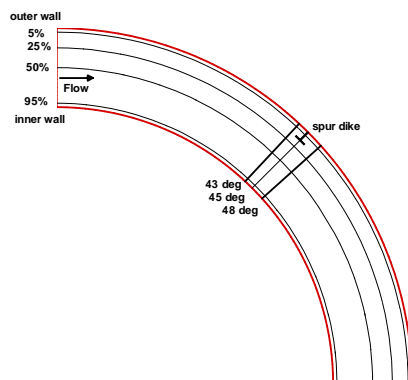
Ettema and Musto (2004) به مطالعه آزمایشگاهی اثر آبشکن بر الگوی جریان و ناحیه جداشدگی در بالادست و پایین‌دست آبشکن در یک کانال مستقیم پرداختند. Giri et al. (2004) به بررسی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان حول آبشکن‌های غیر مستغرق پرداختند. آن‌ها با تغییر دادن موقعیت آبشکن‌ها، به بررسی تأثیر این پارامتر بر روی میدان جریان شکل گرفته حول آبشکن مورد بررسی پرداختند.

Ghodsian and Vaghefi (2009) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر تغییرات عدد فرود و طول بال و جان آبشکن T شکل مستقر در موقعیت 75 درجه بر الگوی جریان واقع در قوس 90 درجه پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش طول آبشکن، طول ناحیه جدایی و گردابه شکل گرفته در این ناحیه افزایش می‌یابد. (Naji et al. 2010) به بررسی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان در قوس 90 درجه پرداختند و نتیجه گرفتند که خطوط جریان در تراز

داخلی قوس 90 درجه مورد مطالعه و موقعیت‌های مختلف نیمرخ‌های طولی بر حسب درصد‌های مختلف عرض کانال از ساحل خارجی کانال و همچنین موقعیت آبشکن و نیمرخ‌های عرضی بالادست و پایین‌دست آبشکن را نشان می‌دهد.



شکل 1 پلان مدل مورد مطالعه (Vaghefi et al. 2009)



شکل 2 موقعیت دیواره‌های داخلی و همچنین نیمرخ‌های طولی و عرضی مختلف در قوس 90 درجه

4- نتایج

در این قسمت، ابتدا به منظور صحت‌سنجی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزار SSIM این داده‌ها با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. در ادامه برای تعیین الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن مستقر در قوس 90 درجه به بررسی و تشریح تغییرات نیمرخ عرضی، عمق بیشینه آبشستگی و مؤلفه‌های سرعت جریان در مقاطع مختلف پرداخته شد. در شکل 3 نمونه‌ای از توزیع مؤلفه

سیال (آب) و δ_{ij} دلتای کرونکر است که برای $i=j$ برابر واحد و در غیر این صورت صفر می‌باشد.

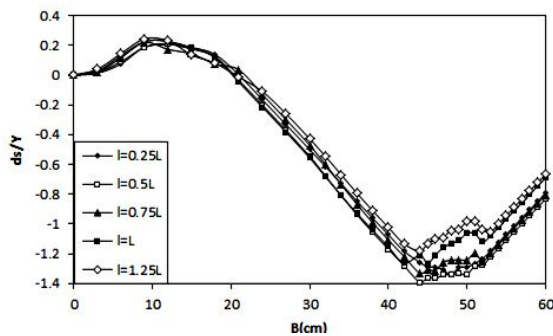
در معادله (1) اولین عبارت سمت چپ، عبارت گذرا و وابسته به زمان، ترم بعدی، عبارت جابجایی، اولین عبارت سمت راست، ترم فشار و آخرین عبارت، ترم تنش‌های رینولدز می‌باشد. همچنین این مدل عددی از روش حجم محدود همراه با الگوریتم قاعده توانی یا الگوریتم مرتبه دوم برای گسسته‌سازی معادلات استفاده کرده و برای کوپل فشار و سرعت از روش SIMPLE استفاده می‌کند (Olsen, 2004).

3- مدل آزمایشگاهی

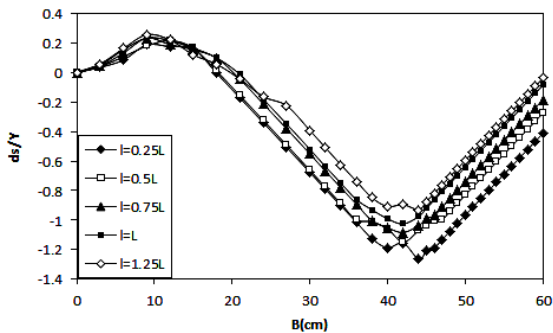
مدل مورد مطالعه یک کانال قوسی شکل با زاویه 90 درجه و با شعاع خارجی 2/4 متر می‌باشد که از دو قسمت مستقیم به طول 7/1 متر در بالادست و 5/2 متر در پایین دست قوس، تشکیل شده است. مقطع کانال مستطیلی بوده و دارای عرض 0/6 متر می‌باشد و کف آن از رسوباتی با ضخامت 35 سانتی متر پوشیده شده است. آبشکن مورد استفاده در این تحقیق دارای پلان T شکل، طول جان و بال 9 و ضخامت 1 سانتی متر می‌باشند که در ساحل خارجی در موقعیت 45 درجه برای بررسی الگوی جریان نصب شده است. همچنین به منظور تعیین تأثیر پارامتر هندسی طول بال آبشکن بر الگوی آبشستگی نسبت‌های مختلف طول بال به طول جان آبشکن (0/25، 0/5، 0/75، 1 و 1/25) نیز مورد بررسی عددی قرار گرفته و در حالت طول بال آبشکن و طول جان آبشکن برابر با نتایج آزمایشگاهی ($l=L=9\text{cm}$) مقایسه شد. همچنین نیمرخ بستر در مدل آزمایشگاهی با استفاده از یک دستگاه لیزری (Laser Bed Profiler) با دقت 0/01 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری سرعت‌ها از دستگاه Vectrino⁺ استفاده شد.

شکل 1 نمایش کلی از کانال مورد مطالعه و آبشکن مورد استفاده را نشان می‌دهد. شکل 2 دیواره‌های خارجی و

آمده كاملاً با هم تطابق دارد. شكل 4 نمونه‌اي از تغييرات عرضي توپوگرافي بستر بدون بعد شده با عمق جريان در بالادست در برابر عرض كانال را در مقاطع قبل و بعد از آبشكن و براي نسبت‌هاي مختلف طول بال به طول جان نشان مي‌دهد كه در اين نمودارها B نشان دهنده فاصله از قوس داخلي است. همان‌طور كه در اين شكل‌ها ديده مي‌شود، مقدار آبستگي براي نسبت طول بال به جان معادل 1/25 كمتري مقدار را دارد. همچنين به خوبي نقش بال آبشكن در حفاظت از ساحل خارجي مشهود است و همان‌طور كه مشاهده مي‌شود با افزايش نسبت طول بال به طول جان آبشكن‌ها، به دليل افزايش ناحيه سكون جريان، مقدار آبستگي در ساحل خارجي نيز کاهش يافته است. همچنين مشاهده مي‌شود كه چاله آبستگي تا حدود دو سوم يا 0/67 عرض كانال پيشروي کرده است.



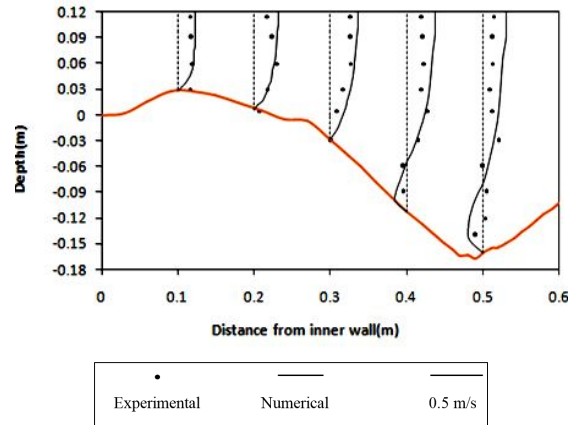
الف - مقطع 44 درجه



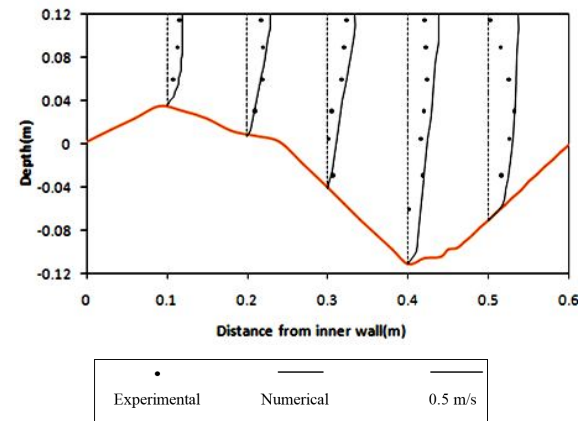
ب - مقطع 46 درجه

شكل 4 تغييرات نيمرخ عرضي بدون بعد شده با عمق جريان بالادست

مماسي سرعت در مقاطع بالادست و پايين‌دست آبشكن براي داده‌هاي آزمايشگاهي و عددی نشان داده شده است (NajiAbhari, 2010; Vaghefi, 2012).



الف - 42/5 درجه

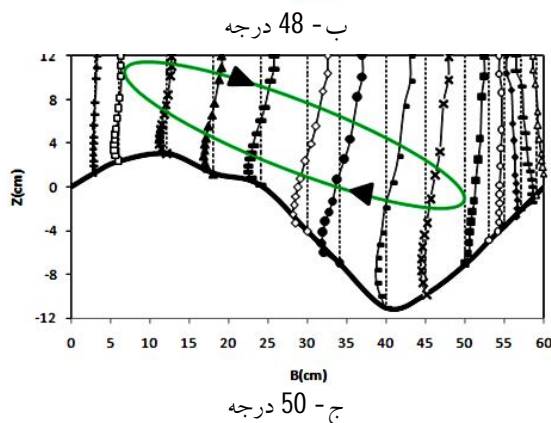
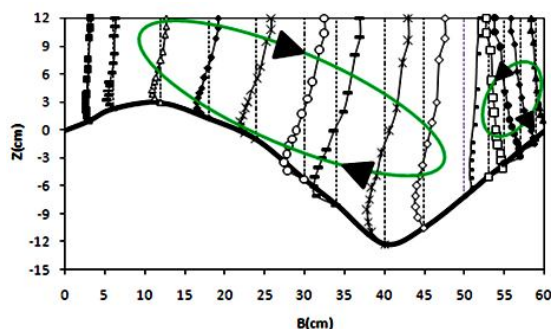
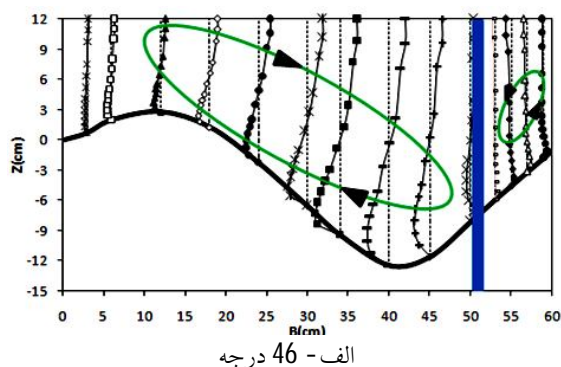


ب - 50 درجه

شكل 3 نمونه‌اي از توزيع مؤلفه مماسي سرعت در مقاطع بالادست و پايين‌دست آبشكن

همان‌طور كه در اين شكل‌ها مشاهده مي‌شود، در نزديكي ديواره داخلي قوس اين داده‌ها تطابق بيشتري نسبت به محدوده اطراف آبشكن دارند. همان‌طور كه قبلاً هم ذكر شد اين اختلاف مي‌تواند تا حد زيادي ناشي از اختلاف شكل نوک بال آبشكن در مدل‌هاي آزمايشگاهي (گردگوشه) و عددی (مستطیلی) و همچنين عدم تطابق كاملاً دقيق موقعيت‌هاي برداشت داده‌هاي آزمايشگاهي با مدل‌سازي عددی باشد. اما روند تغييرات پديده بوجود

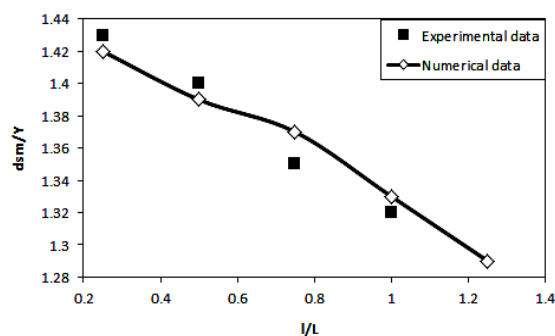
داخلی، یک جریان ثانویه خفیف‌تر نسبت به جریان ثانویه اصلی در محدوده بین بال پایین‌دست آبشکن و دیواره خارجی کانال نیز مشاهده می‌شود که جهت آن پادساعتگرد بوده که نشان‌دهنده جریان بازگشتی در محدوده پایین‌دست آبشکن می‌باشد.



شکل 6 نمونه‌ای از مؤلفه شعاعی سرعت در مقاطع مختلف پایین‌دست آبشکن

در شکل 6-ب و برای مقطع 48 درجه، نیز همانند مقطع 46 درجه دو گردابه اصلی مشاهده می‌شود، با این تفاوت که در مقطع 48 درجه جریان ثانویه دومی از قدرت

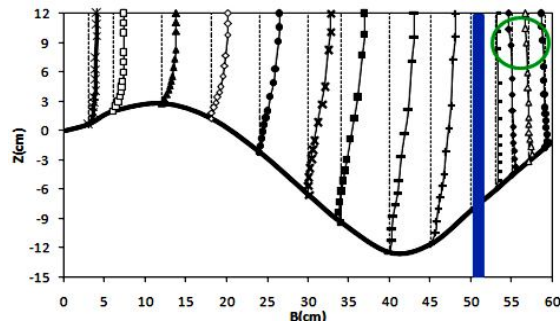
شکل 5 بیانگر عمق آبشستگی بیشینه (d_{sm}) بدون بعد شده با عمق جریان در بالادست جریان در برابر طول بال بی‌بعد شده با طول جان آبشکن برای داده‌های آزمایشگاهی و عددی می‌باشد. شکل بیانگر آن است که نتایج مدل عددی ارائه شده و مدل آزمایشگاهی از تطابق خوبی نسبت به هم برخوردار می‌باشند. میزان خطای داده‌های عددی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی به صورت نقطه به نقطه اندازه‌گیری شد. میزان خطای محاسبه شده کمتر از 15 درصد می‌باشد که این مقدار خطا، قابل قبول می‌باشد. همان‌طور که مشخص است محدوده تغییرات عمق آبشستگی بیشینه بین $1/29$ تا $1/42$ برابر عمق جریان در بالادست می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت طول بال به طول جان آبشکن، عمق آبشستگی بیشینه برای هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی به دلیل کاهش تمرکز تنش در جلوی دماغه آبشکن کاهش می‌یابد. همچنین محل آبشستگی بیشینه در نزدیکی بال بالادست آبشکن و به فاصله حدود 12 تا 40 درصد طول آبشکن از نوک بال بالادست آبشکن اتفاق می‌افتد.



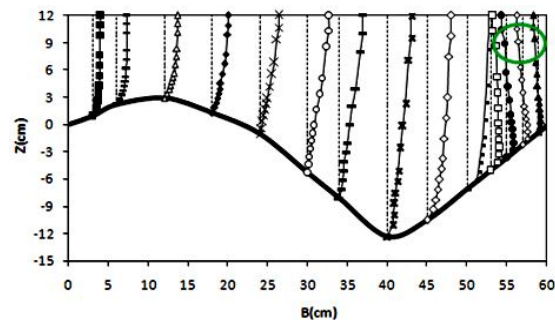
شکل 5 تغییرات عمق آبشستگی بیشینه بی‌بعد با عمق جریان بالادست در برابر طول بال بی‌بعد با طول جان آبشکن برای مدل‌های آزمایشگاهی و عددی

در شکل 6 نمونه‌ای از نیمرخ مؤلفه عرضی سرعت در مقاطع مختلف پایین‌دست آبشکن نشان داده شده است. در شکل 6-الف برای مقطع عرضی 46 درجه، علاوه بر جریان ثانویه اصلی در فاصله بین بال آبشکن و ساحل

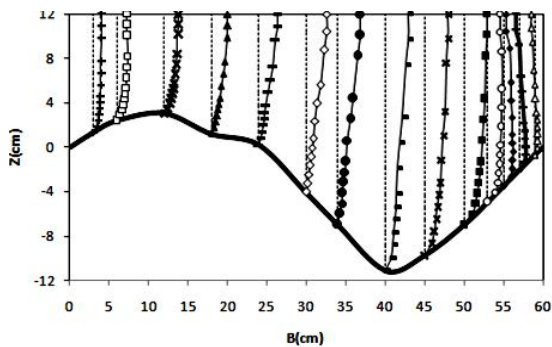
ساحل خارجي جريان رو به پايين حاكم است و در وسط كانال جريان رو به بالا مجدداً حاكم مي‌باشد كه تركيب اين جريان با جريان شكل گرفته در دو راستاي ديگر، گردابه‌هاي بوجود آمده در چاله آبستگي را نشان مي‌دهد.



الف - 46 درجه



ب - 48 درجه



ج - 50 درجه

شكل 7 نمونه‌اي از نيمرخ مؤلفه طولی سرعت در مقاطع مختلف پايين دست آبشكن

5- نتیجه گیری

در اين تحقيق به منظور شناخت بهتر الگوی جريان و

بيشتری نسبت به مقطع 46 درجه برخورددار می‌باشد كه دليل آن می‌تواند ورود جريان به نيمه دوم قوس باشد. در شكل 6- ج و برای مقطع 50 درجه، فقط يك جريان ثانويه اصلي ديده می‌شود كه اين به معنای آن است كه ناحیه بازگشتی در اين مقطع ديگر وجود ندارد و قبل از مقطع 50 درجه به اتمام رسيده است.

شكل 7 نمونه‌هایی از نيمرخ مؤلفه مماسی سرعت را در مقاطع مختلف پايين دست آبشكن نشان می‌دهد. در شكل 7- الف، فقط در ترازهای بالایی نزديك سطح آزاد و در محدوده بين بال پايين دست و ديواره خارجي جريانی در خلاف جهت جريان اصلي مشاهده می‌شود. در شكل 7- ب، مقطع 48 درجه نیز روندي مشابه مقطع 46 درجه مشاهده می‌شود. اما در شكل 7- ج به خوبی مشاهده می‌شود كه فقط جريان رو به جلو موجود می‌باشد و اين يعنی اينكه در اين مقطع ناحیه بازگشتی پايين دست آبشكن مستهلك شده است.

شكل 8 نیز نمونه‌ای از نيمرخ مؤلفه عمقی سرعت را در پايين دست آبشكن نشان می‌دهد. در شكل 8- الف كه مقطع 46 درجه و به فاصله برابر با نصف طول آبشكن در پايين دست می‌باشد، دو ناحیه مهم در آن قابل مشاهده می‌باشد. یکی ناحیه نزديك بستر كه در آن جريان رو به بالا وجود دارد (U) و دیگری ناحیه‌ای كه در آن جريان رو به پايين وجود دارد (D) و تركيب اين جريان با مؤلفه سرعت مماسی و نیز سرعت شعاعی بيانگر وجود و تشكيل جريان حلزونی می‌باشد. علاوه بر دو ناحیه ذكر شده، در محدوده بين بال بالادست آبشكن و ديواره خارجي نیز جريان رو به پايين می‌باشد كه دليلی بر ايجاد آبستگي در نوک بال و جلو دماغه آبشكن می‌باشد. ولی در شكل 8- ب يعنی به فاصله تقريباً $1/6$ برابر طول آبشكن از محل نصب آبشكن در پايين دست، مشاهده می‌شود كه در ناحیه نزديك ديوار خارجي جريان رو به بالا وجود دارد و در محدوده يك سوم عرض كانال از

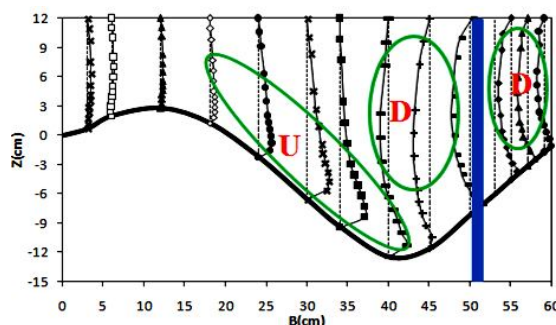
- در مقاطع پایین دست آبشکن (مقاطع 46 و 48 درجه) دو گردابه که جهت آن‌ها در خلاف جهت هم می‌باشند، به وجود می‌آید.

- در مقطع عرضی 50 درجه، ناحیه بازگشتی پایین دست آبشکن، مستهلک شده است.

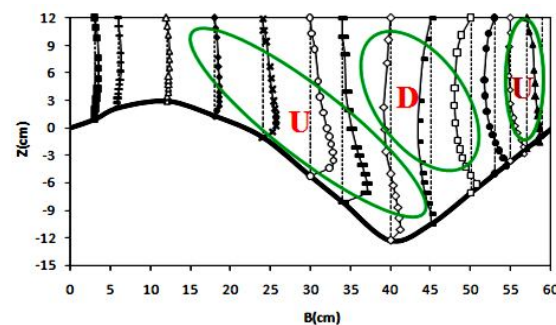
- در محدوده بین بال بالادست آبشکن و دیواره خارجی، جریان رو به پایین وجود دارد که دلیلی بر آبشستگی در نوک بال آبشکن و جلو دماغه آبشکن می‌باشد.

- نتایج بیانگر تطابق مناسب بین مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

آبشستگی پیرامون آبشکن مستقر در قوس خارجی رودخانه، به مدل‌سازی آن با استفاده از نرم‌افزار SSIIM پرداخته شده است که مهم‌ترین نتایج آن به شرح زیر است.



الف - 46 درجه



ب - 48 درجه

شکل 8 نمونه‌ای از نیم‌رخ مؤلفه عمقی سرعت

در پایین دست آبشکن

6- فهرست علائم

B	عرض کانال
D	جریان رو به پایین
D_{50}	قطر متوسط رسوبات
d_{sm}	عمق آبشستگی بیشینه
L	طول جان آبشکن
l	طول بال آبشکن
P	فشار
X_i	فاصله در جهت های مختلف
U	جریان رو به بالا
U_i	سرعت جریان در جهت های مختلف
Y	عمق جریان
Z	تراز عمقی جریان
ρ	جرم مخصوص آب
δ_{ij}	دلتای کرونگر

7- منابع

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور (1388). "راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای"، نشریه شماره 516.

واقفی م، قدسیان م. و صالحی نیشابوری ع. (1387). "مطالعه آزمایشگاهی الگوی جریان سه بعدی و آبشستگی در قوس 90 درجه"، مجله علمی و پژوهشی هیدرولیک ایران، دوره 3.

- با افزایش نسبت طول طول بال به طول جان آبشکن، آبشستگی بیشینه کاهش می‌یابد.

- مقدار آبشستگی برای نسبت طول بال به جان معادل 1/25، کمترین مقدار را دارد.

- چاله آبشستگی اصلی تا حدود دو سوم یا 0/67 عرض کانال به سمت پایین دست پیشروی کرده است.

- محدوده تغییرات عمق آبشستگی بیشینه بین 1/29 تا 1/42 برابر عمق جریان در بالادست می‌باشد.

- محل آبشستگی بیشینه در نزدیکی بال بالادست آبشکن و به فاصله حدود 12 تا 40 درصد طول آبشکن از نوک بال بالادست آبشکن اتفاق می‌افتد.

- شماره 3، ص.ص. 57-41.
- Ghodsian M. and Vaghefi M. (2009). "Experimental study on scour and flow field in scour hole around a T shaped spur dike in a 90° bend", *International Journal of Sediment Research*. Vol. 24, No. 2, pp. 145-158.
- NajiAbhari M., Ghodsian M., Vaghefi M. and Panahpur N. (2010). "Experimental and numerical simulation of flow in a 90 bend", *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 21, No. 3, pp. 292-298.
- Olsen N, R, B (2004). "A three dimensional numerical model for simulation movement in water intakes with multi block option", Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology.
- Vaghefi M., Ghodsian M. and Salehi Neyshabouri S.A.A. (2009). "Experimental study on the effect of a T shaped spur dike length on scour in a 90° channel", *The Arabian Journal for Science and Engineering*. Vol. 34, No. 2B, pp. 337-348.
- Vaghefi M., Ghodsian M. and Salehi Neyshabouri S.A.A. (2012). Experimental study on scour around a T-Shaped spur dike in a channel bend. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 138, No. 5, pp. 471-474.
- واقفي م.، قدسيان م. و صالحی نيشابوری ع. (1388). "بررسی آزمایشگاهی اثر شعاع انحنا و موقعیت استقرار آبشکنهای T شکل در قوس 90 درجه بر میزان آبستگي اطراف آنها"، *مجله علمی و پژوهشی هیدرولیک ایران، دوره چهارم، شماره 1، ص.ص. 107-91.*
- واقفي م. و قدسيان م. (1389). "تأثير استقرار آبشکن T شکل بر توپوگرافی پایین دست بستر قوس 90 درجه"، *مجله علمی و پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد، سال بیست و دوم، شماره 1، ص.ص. 113-128.*
- Ettema R. and Muste M. (2004). "Scale effect in flume experiments on flow around a spur dike in flat bed channel", *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 130, No. 7, pp. 635-646.
- Giri S., Shimizu Y. and Surajata B. (2004). "Laboratory measurement and numerical simulation of flow and turbulence in a meandering-like flume with spurs". *Flow Measurement and Instrumentation*. No. 15, pp. 301-309.