

اثر تنگ شدگی مقطع ناشی از آبشکن در قوس بر الگوی جریان با نرم افزار FLOW-3D

سمیه الیاسی¹، افشین اقبال زاده²، میترا جوان³، محمد واقفی^{4*}

تاریخ دریافت: 1394/9/14 تاریخ پذیرش: 1394/12/12

چکیده

آبشکن‌ها یکی از انواع سازه‌های هیدرولیکی هستند که به منظور تثبیت جداره خارجی رودخانه‌ها و هدایت جریان مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اهمیت شناخت الگوی جریان در اطراف آبشکن‌ها، در تحقیق حاضر ابتدا الگوی جریان در اطراف آبشکن T شکل، مستقر در یک کانال قوسی 90 درجه شبیه‌سازی شد. این کانال دارای بستر صلب بوده و به ترتیب دارای شعاع انحنا و نسبت شعاع به عرض 2/4 و 4 است. برای شبیه‌سازی الگوی جریان از نرم افزار FLOW-3D استفاده شده و سپس اثر تنگ‌شدگی مقطع بر الگوی جریان مورد بررسی قرار گرفت. جهت شناخت پروفیل سطح آب از مدل سطح آزاد VOF¹ و برای شبیه‌سازی تلاطم جریان حول آبشکن از مدل آشفتگی RNG k-ε استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نتایج عددی و آزمایشگاهی تطابق به نسبت مناسبی دارند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های مختلف به ازای تنگ‌شدگی‌های 10، 20 و 25 درصدی مقطع کانال بیان گر این است که با افزایش تنگ‌شدگی مقطع، نوسانات سطح آب نیز بیش‌تر شده و بیش‌ترین ارتفاع در بالادست و کم‌ترین ارتفاع در پایین‌دست مربوط به آبشکن با ابعاد بزرگ‌تر است. علاوه بر این، گردابه‌ها نیز در طول بیش‌تری از قوس در ناحیه پایین‌دست آبشکن ظاهر می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، شبیه‌سازی عددی، قوس 90 درجه، نرم افزار FLOW-3D

مقدمه

داخلی که سرعت کم‌تری دارد رسوب‌گذاری رخ می‌دهد. یکی از راه‌های بسیار رایج برای ساماندهی مسیر رودخانه‌ها و حفظ پایداری سواحل، استفاده از سازه آبشکن می‌باشد (واقفی و قدسیان، 1388). آبشکن‌ها از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند که از دیواره رودخانه به سمت محور جریان توسعه یافته و سبب انحراف و هدایت جریان از کناره‌ها به سمت محور مرکزی راستای رودخانه می‌گردند. افزودن آبشکن به قوس، جهت جلوگیری از پدیده فرسایش و رسوب‌گذاری پیچیدگی الگوی جریان را دوچندان می‌کند. با توجه به مطالب ذکر شده شناخت هیدرودینامیک جریان و الگوی شکل‌گرفته در اطراف آبشکن‌ها اهمیت بسیار زیادی دارد. شمار تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده در رودخانه‌های قوسی با آبشکن و بدون وجود آبشکن بسیار زیاد بوده در حالی که مطالعات کم‌تری به صورت عددی انجام شده است. از جمله مهم‌ترین این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

مکانیزم حرکت آب در رودخانه‌های قوسی، به دلیل تشکیل جریان‌های ثانویه اغلب به گونه‌ای است که بستر و کناره‌ها را دست‌خوش تغییرات زیادی می‌کند و همین امر باعث تغییر مسیر رودخانه می‌گردد. با حضور جریان در قوس، نیروهای گریز از مرکز بر جریان حاکم می‌شوند و از آن‌جا که تنش برشی فقط در بستر وجود دارد و سطح آزاد فاقد آن است پروفیل سرعت در راستای عمود غیریکنواخت می‌شود (صفرزاده، 1383). با پیش روی در طول قوس جریان‌های ثانویه شکل می‌گیرند و سطح آب را در جداره خارجی بالا برده و در جداره داخلی پایین آورده و آن را به شکل شیب‌دار در می‌آورند. این امر باعث تشکیل گرادیان فشار جانبی می‌گردد که در اثر اندرکنش آن با نیروهای گریز از مرکز، جریان‌های حلزونی تشکیل می‌شوند. در جداره خارجی قوس که سرعت بیش‌تری دارد فرسایش و در جداره

کوپلند در یک بررسی آزمایشگاهی به مطالعه اثر موقعیت آبشکن، انحنای کانال و فاصله بین آبشکن‌ها بر تغییرات آب‌شستگی پرداخت. ایشان نتیجه گیری نمود که حداکثر عمق آب‌شستگی موضعی در آبشکن‌ها، در پایین دست راس قوس اتفاق می‌افتد در حالی که عمق حداکثر آب‌شستگی برای آبشکن‌هایی که در ورودی و خروجی قوس خارجی قرار دارند به میزان قابل توجهی کوچک‌تر است (Copeland,).

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه
2 و 3- استادیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه
4- دانشیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس بوشهر
(* - نویسنده مسئول: (Email: vaghefi@pgu.ac.ir)

افزایش می‌یابد (Fazli et al., 2008). واقفی و همکاران در اطراف یک آبشکن T شکل مستقر در قوس 90 درجه، اثر طول آبشکن بر روی عمق آبشستگی را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که هر چقدر طول آبشکن بیش‌تر شود، عمق ماکزیمم آبشستگی و حجم و ابعاد چاله آبشستگی نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین میزان آبشستگی در بالادست آبشکن در مقایسه با پایین دست آبشکن مقدار بیش‌تری می‌باشد (Vaghefi et al., 2009). اولسن به محاسبه عددی تغییرات تراز بستر در قوس 90 درجه با در نظر گرفتن شیب‌های تند عرضی با استفاده از نرم افزار SSIIM پرداخت (Olsen., 2009). ژانگ و همکاران با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی به بررسی آشفستگی جریان حول آبشکن تخت نفوذ ناپذیر پرداختند. ایشان جهت شبیه‌سازی میدان جریان، مدل آشفستگی $k - \varepsilon$ را به کار بردند و چنین نتیجه‌گیری نمودند که مدل آشفستگی $k - \varepsilon$ مدل مناسبی برای شبیه‌سازی جریان‌های متلاطم است (Zhang et al., 2009). ناجی ابهری و همکاران با استفاده از مدل عددی SSIIM به بررسی الگوی جریان در قوس 90 درجه پرداختند و پارامترهای دبی و عدد فرود را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج مدل‌سازی خود را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند (NajiAbhari et al., 2010). مسجدی و همکاران آزمایشاتی بر روی سری هندسی آبشکن T شکل به منظور بررسی تغییرات آبشستگی اطراف آن در دو موقعیت 45 و 60 درجه از قوس 180 درجه رودخانه‌ها و برای آبشکن‌های T شکل با لبه‌های صاف، گرد و پخ انجام دادند و نتیجه‌گیری نمودند که برای شکل بال نیم دایره‌ای، عمق حداکثر آبشستگی نسبت به بال مستطیلی، 20 درصد کاهش می‌یابد (Masjedi et al., 2010). واقفی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان در قوس 180 درجه تند پرداختند. آن‌ها پارامترهای مختلفی از جمله قدرت جریان ثانویه، ورتیسیته، تنش برشی بستر و هم‌چنین بیشینه سرعت جریان را محاسبه نمودند. مشاهدات بیانگر این است که بیشینه سرعت و هم‌چنین تنش برشی بستر در نزدیکی دیواره داخلی قوس و در مقطع 40 درجه به وقوع می‌پیوندد (Vaghefi et al., 2014-2015). استادی و همکاران به بهینه‌سازی طراحی ابعاد آبشکن‌های رودخانه‌ای و نقش آن در پایدارسازی مورفولوژیکی رودخانه پرداختند. نتایج حاکی از به کارگیری معادلات بار بستر و آبشستگی، نقش بسزایی در تعیین ابعاد آبشکن و هزینه‌های ساخت سازه خواهند داشت. از بین معادلات بار بستر استفاده شده معادله Englund and Fredsoe بیش‌ترین ظرفیت انتقال رسوب و کم‌ترین هزینه و معادله بار بستر Van Rijn کم‌ترین ظرفیت انتقال رسوب و بیش‌ترین هزینه را نتیجه می‌دهند (استادی و همکاران، 1393). الیاسی و همکاران به صورت عددی به بررسی تأثیر شکل آبشکن مستغرق بر الگوی جریان در کانال‌های مستقیم پرداختند و نتایج عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. بررسی

1983). مصباحی به بررسی آزمایشگاهی تأثیر حضور آبشکن بر عمق حفره آبشستگی در قوسی با شعاع انحنا 3/5 پرداخت که در آن 6 آبشکن به نحوی در قوس مستقر شدند که عرض جریان جلوی آبشکن با حالت بدون آبشکن تفاوتی نداشته باشد. وی نتیجه گرفت که احداث آبشکن در قوس‌ها، عمق حفره‌ی آبشستگی را عمیق‌تر می‌کند (Mesbahi., 1992). پرزجوسکی مطالعاتی بر روی آبشکن‌های موجود در قوس‌های رودخانه Warta انجام داد که منجر به تأیید نتایج به دست آمده از تحقیقات Copeland گردید. اوهم - چنین متوجه شد که سرعت‌های جریان در داخل گردابه‌ها و عرض و عمق حفره‌های آبشستگی بستگی به انحنا قوس و موقعیت قرارگیری آبشکن‌ها دارد (Perzedwojski et al., 1995). پی و مک کورکودال به شبیه‌سازی هیدرودینامیکی جریان در قوس به صورت سه بعدی پرداختند. آن‌ها با اشاره به فرض یکنواختی لزجت گردابه‌ای در حالت استاندارد و در نتیجه ناکارآمدی این مدل در پیش‌بینی جریان‌های دارای انحنا شدید، این مدل را اصلاح کردند (Ye and McCorquodale., 1998). سلیمان و همکاران به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر آبشکن بر مورفولوژی قوس‌های رودخانه نیل پرداختند و یک مدل ریاضی دو بعدی در خصوص تأثیر آبشکن‌ها و مؤلفه‌های سرعت ارائه نمودند. در این مدل، از طول‌ها و فواصل مختلف آبشکن‌ها استفاده شده تا تأثیر آن‌ها را بر روی تراز سطح آب و مؤلفه‌های سرعت ارزیابی نمایند. آن‌ها نشان دادند که افزایش محسوس در بالا آمدن تراز سطح آب هنگامی مشاهده می‌شود که طول آبشکن حداقل 6 درصد عرض مجرا را مسدود کند (Solimani et al., 1998). وو و همکاران به بررسی سه بعدی الگوی جریان با در نظر گرفتن رسوبات به صورت بار بستر و معلق در یک قوس 180 درجه پرداختند. آن‌ها به تعیین توزیع زاویه تابیدگی بردار سرعت به صورت متوسط گیری شده نیز پرداختند و نتیجه گرفتند که در سطوح بالای برای مقاطع واقع در نزدیکی دیواره خارجی بیش‌تر از مقاطع سمت مقابل می‌باشد (Wu et al., 2000). کاسم و چادری با به کارگیری یک مدل دو بعدی به پیش‌بینی تغییر شکل بستر نسبت به زمان در قوس پرداختند. هم‌چنین آن‌ها نتایج حاصل از مدل‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند که از تطابق خوبی برخوردار بود (Kassem and Chaudhry., 2002). روکا و همکاران اقدام به مطالعه آزمایشگاهی کاهش فرسایش و آبشستگی بستر بوسیله استقرار یک نمونه از پی‌سازی خاص نمودند که منجر به 40% کاهش در آبشستگی (Roca et al., 2007). فضلی و همکاران با انجام مطالعه آزمایشگاهی بر روی کانال مستطیلی قوسی با زاویه مرکزی 90 درجه، به بررسی پارامترهای موثر بر الگوی جریان و آبشستگی در اطراف آبشکن کوتاه و مستقیم پرداخت. نتایج تحقیقات وی در کانال قوسی با وجود تک آبشکن نشان می‌دهد که در قوس‌های توسعه یافته با افزایش فاصله آبشکن از شروع قوس عمق حداکثر آبشستگی

است. اگر در مختصات کارترین استفاده شود مقادیر $R = 1$ و $\xi = 0$ است.

معادلات مومنتم:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

در این معادلات (G_x, G_y, G_z) معرف شتاب بدنه در سه راستای (x, y, z) هستند. برای مدل سازی سطح آزاد از روش VOF و برای حل معادلات ناویراستوکس از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استفاده شده است. از طریق معادله (5) یعنی جز حجم سیال به دست می آید. معرف جز حجمی اشغال شده توسط سیال است که به ازای مقدار 1 حجم سلول پر از سیال و به ازای مقدار 0 حجم سلول خالی از سیال و پر از هوا را نشان می دهد.

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

مشخصات میدان حل

در این تحقیق جهت صحت سنجی مدل عددی از داده های آزمایشگاهی به دست آمده توسط واقفی در یک فلوم قوسی 90 درجه مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران استفاده شده است. این کانال متشکل از یک مسیر مستقیم در بالادست به طول 7/1 متر، یک مسیر مستقیم در پایین دست به طول 5/2 متر و یک قوس 90 درجه با شعاع انحنای داخلی 2/1 متر و شعاع انحنای خارجی 2/7 متر است ($R/B=4$). این قوس رابط بین دو مسیر مستقیم یاد شده است. عرض کانال در کل مسیر 60 سانتی متر، ارتفاع برابر 70 سانتی متر و شیب کف برابر با 0/001 است. جریان با دبی 25 لیتر بر ثانیه وارد کانال می گردد. کف این کانال از رسوبات فریز شده با قطر متوسط 1/28 میلی متر و با انحراف معیار 1/3 میلی متر، به ضخامت 35 سانتی متر پوشیده شده است. در این کانال یک آبشکن T شکل با طول بال و جان 9 سانتی متر، ضخامت 1 سانتی متر و ارتفاع 65 سانتی متر در زاویه 45 درجه مستقر شده است که در شکل 1 مشخصات کانال نمایش داده شده است. پس از صحت سنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی به مطالعه پارامتریک تأثیر تغییر هم زمان طول بال و جان آبشکن بر روی الگوی جریان پرداخته شده است که در شکل 2 ابعاد آبشکن های مورد استفاده جهت این مدل سازی نشان

داده های عددی نشان داد که در بین آبشکن های مورد بررسی، آبشکن T-شکل بهترین عملکرد را داشته و میزان فرسایش جداره کانال را کاهش داده است (Elyasi et al., 2015). واقفی و همکاران به صورت عددی اثر عدد فرود و درصد استغراق بر الگوی جریان پیرامون آبشکن T شکل در قوس 90 درجه را با استفاده از نرم افزار Flow-3D بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که با افزایش عدد فرود در پایین دست آبشکن، فاصله جریان های بازگشتی از جان آبشکن حدود 10 درصد بیش تر می شود و همچنین در نزدیکی دیواره داخلی با افزایش استغراق آبشکن، سرعت طولی به نصف سرعت اولیه کاهش می یابد (Vaghefi et al., 2014-2015).

با توجه به موارد ذکر شده مشاهده می شود که تاکنون مطالعه عددی در مورد تأثیر تنگ شدگی مقطع در کانال های قوسی تحت تأثیر استقرار آبشکن بر تغییرات الگوی جریان انجام نشده است. به همین دلیل در تحقیق حاضر، به شبیه سازی عددی الگوی جریان حول آبشکن T شکل با طول های مختلف بال و جان مستقر در قوس 90 درجه با استفاده از نرم افزار FLOW-3D پرداخته شده است. در این مدل سازی شبکه بندی به صورت کارترین انجام شد و از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ نیز جهت بستن معادلات ناویراستوکس استفاده شد. به منظور صحت سنجی مدل، نتایج عددی بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی برای سرعت های طولی و سطح آزاد مقایسه شدند. در ادامه به بررسی اثر تنگ شدگی مقطع به دلیل تغییر هم زمان طول بال و جان آبشکن T شکل بر الگوی جریان در قوس 90 درجه پرداخته شد.

معرفی مدل عددی

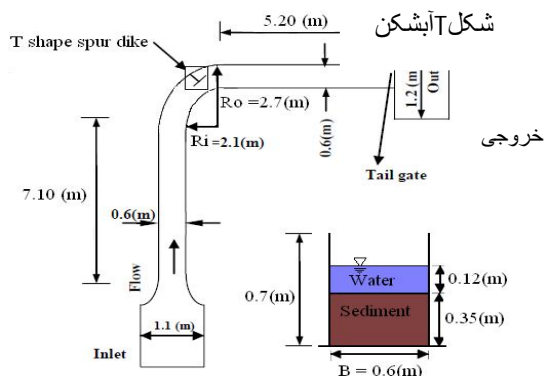
نرم افزار FLOW-3D یکی از کارآمدترین نرم افزارها در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که بر پایه روش احجام محدود به حل معادلات می پردازد. این برنامه قادر به شبیه سازی جریان های سه بعدی دارای سطح آزاد و با هندسه پیچیده است و جهت شبکه بندی میدان حل از یک شبکه متشکل از سلول های مستطیلی استفاده می کند. در این نرم افزار مش بندی منطقه مورد مطالعه با سلول های مستطیلی و در شبکه جابجا شده انجام می شود.

معادله پیوستگی

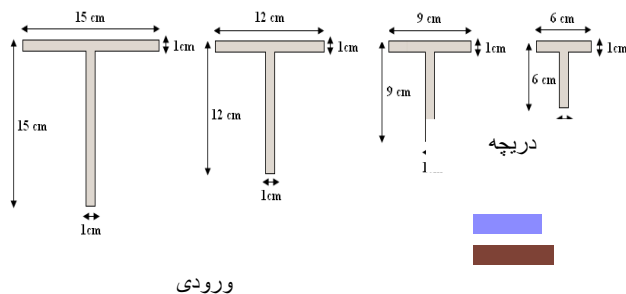
$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\delta}{\delta x} (\rho u A_x) + R \frac{\delta}{\delta y} (\rho v A_y) + \frac{\delta}{\delta z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = RDIF + RSOR \quad (1)$$

که V_F کسر حجمی فضای باز به جریان، ρ دانسیته سیال، $RDIF$ ترم نفوذپذیری آشفتگی و $RSOR$ منبع جرم است. u, v, w اجزای سرعت در جهت های x, y, z یا r, z, θ هستند. A_x, A_y, A_z برابر مساحت کسری محیط به جریان در جهت های x, y, z هستند. ξ مربوط به سیستم مختصات انتخابی

داده شده است.



شکل 1- کانال آزمایشگاهی با قوس 90 درجه شکل



ورودی

2- نمایش شماتیک آبشکن های T شکل با طول های مختلف

یک بلوک داخلی نیز در محل استقرار آبشکن با استفاده از تکنیک شبکه تو در تو جهت ریزتر کردن مش و بالابردن دقت مدل در این ناحیه تعریف شده است. مش های نواحی حساس تر مانند نواحی نزدیک به جداره در مسیرهای مستقیم بالادست و پایین دست و هم-چنین در راستای عمق کانال ریزتر انتخاب شده اند. فاصله اولین سلول از دیواره به نحوی انتخاب شده است که اولین سلول در ناحیه لگاریتمی قرار گیرد، به عبارتی پارامتر بدون بعد y^+ که بصورت رابطه 7 تعریف می شود مقداری بیش از حدود 12 داشته باشد.

$$y^+ = \frac{y_1 u_*}{\nu} \quad (6)$$

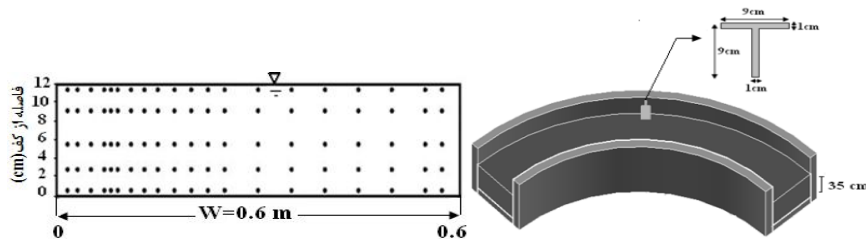
که در رابطه فوق y_1 فاصله مرکز سلول از دیواره در جهت عمود بر دیواره، u_* سرعت برشی دیواره و ν لزجت سینماتیکی است.

شرایط مرزی

از آنجا که در مرز ورودی دبی جریان برابر 25 لیتر بر ثانیه است از شرط مرزی دبی ثابت استفاده شده است. هم-چنین در کف و دیواره ها شرط مرزی دیوار (wall) اعمال شده است و زبری کف برابر 0/00128 در نظر گرفته شده است.

شبکه بندی مدل

در این تحقیق، با توجه به پیچیدگی الگوی جریان حول آبشکن در قوس از نرم افزار FLOW-3D که یک نرم افزار سه بعدی است استفاده شده است. این نرم افزار با بهره گیری از یک شبکه بندی کارترین قادر است با تولید آسان و منظم شبکه های مستطیلی و با بهره گیری از روش های تفاضل محدود یا حجم محدود به حل معادلات عددی می پردازد. این نرم افزار با استفاده از روش FAVOR سطوح و اجسام صلب را مدل سازی می کند. در این روش مرزهای صلب دیواره های کانال به مدل معرفی می شوند. هندسه میدان جریان نیز توسط نرم افزار AUTO CAD تهیه می گردد که تحت عنوان فایل STL به محیط نرم افزار FLOW-3D معرفی می گردد. شکل 3 بیان گر نقاط برداشت داده های آزمایشگاهی مؤلفه های سرعت است. در شکل 4 نیز به عنوان نمونه نحوه استقرار این آبشکن در قوس 90 درجه نشان داده شده است. از آنجا که در شبیه سازی عددی شبکه بندی یکی از مهم ترین مراحل شبیه سازی است بعد از بررسی چندین مدل مش بندی و با توجه به هندسه پیچیده قوس، شبکه بندی کانال به روش چند بلوکی و با تعریف 4 بلوک انجام شده است که در مسیرهای مستقیم بالادست و پایین دست و قوس قرار گرفته اند و



شکل 3- نقاط برداشت داده‌های آزمایشگاهی مؤلفه‌های سرعت

شکل 4- موقعیت استقرار آبشکن در قوس 90 درجه و ابعاد آن.

جداره‌های داخلی و خارجی و در سطح آب کمی از انطباق نتایج نسبت به سایر عرض‌های مقطع کاسته می‌شود. به نظر می‌رسد حضور آبشکن در قوس باعث افزایش سرعت و منحرف شدن حداکثر سرعت از جداره خارجی به میانه کانال می‌شود که در نمودارهای نشان داده شده مقایسه حداکثر سرعت در عرض‌های میانی، این مطلب را تایید می‌کند. در زاویه 60 درجه یعنی در پایین دست آبشکن که هنوز اثر حضور آبشکن و گردابه‌های تشکیل شده در اطراف آن از بین نرفته است، عدم انطباق وجود دارد.

در این قسمت خطای مربوط به صحت‌سنجی سرعت‌های طولی در عمق از $RMSE^1$ محاسبه می‌شود. طبق تعریف، جذر متوسط مربعات خطا ($RMSE$) بیان‌گر اختلاف مقادیر تخمینی با اطلاعات اندازه‌گیری می‌باشد و از رابطه‌ی 8 بدست می‌آید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_m)^2} \quad (8)$$

در این رابطه N تعداد نقاط اندازه‌گیری، Y_i مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و Y_m مقادیر تخمینی توسط مدل را نشان می‌دهند. همان‌طور که در جدول 1 نشان داده شده انطباق نتایج در زاویه 40 درجه یعنی بالادست آبشکن، مناسب‌تر از زوایای پایین دست 50 و 60 درجه از آبشکن است. البته عمده خطا در مقطع 60 درجه به خطای زیاد، حاصل از نزدیک شدن به جداره داخلی یعنی $w=0.5$ (m بر می‌گردد).

در شکل 6 مقادیر عددی و آزمایشگاهی سرعت طولی به ترتیب در زوایای 40، 50 و 60 درجه در عمق‌های مختلف نزدیک کف (0/5) سانتی‌متر، و نزدیک سطح (9 سانتی‌متر) با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل 6 ملاحظه می‌گردد، در زاویه 50 درجه واقع در پایین دست آبشکن در همگی پروفیل‌ها، سرعت‌های طولی منفی در جداره خارجی قوس مشاهده می‌شوند که به علت جداشدگی جریان در این ناحیه اتفاق می‌افتد. به عبارتی در این ناحیه جریان‌های چرخشی پایین دست آبشکن وجود دارند. جریان در این ناحیه ترکیبی از جریان بالارونده، گردابه‌های سطحی و جریان برگشتی خواهد بود و در واقع گردابه‌های تشکیل شده در این ناحیه در جداره خارجی یک ناحیه کم

مقدار زبری در نرم‌افزار FLOW-3D برابر است با میانگین تغییرات ارتفاع در زبری سطح و در صورت معلوم بودن زبری سطح به طور مستقیم مقدار آن در مدل اعمال می‌گردد و در غیر این صورت از فرمول مانینگ (رابطه 7) برای محاسبه زبری استفاده می‌شود. که در آن R_h بیان‌گر شعاع هیدرولیکی است.

$$k = \frac{R_h}{10^n \left(\frac{0.046}{R_h} R_h^{1/6} - 1.088 \right)} \quad (7)$$

$$\log\left(\frac{R_h}{k}\right) = \frac{0.046}{n} R_h^{1/6} - 1.088$$

در مرز فوقانی میدان محاسباتی شرط تقارن به کار رفته است. سطح آزاد با استفاده از روش حجم سیال شبیه‌سازی شده است. در مرز خروجی نیز با توجه به معلوم بودن ارتفاع سیال شرط مرزی فشار معین در نظر گرفته شده است. با فرض فشار ثابت در مرز خروجی، با تعیین عمق جریان در پایین دست کانال، می‌توان ارتفاع جریان در کانال را به نحوی تنظیم کرد که به میزان آن در آزمایشگاه برسد.

جدول 1- خطای میانگین مربع‌ها در مقاطع عرضی مختلف

RMSE برای سرعت‌های طولی در عمق			
40 درجه	50 درجه	60 درجه	میانگین کل مقاطع
5/713	8/17	15/14	9/67

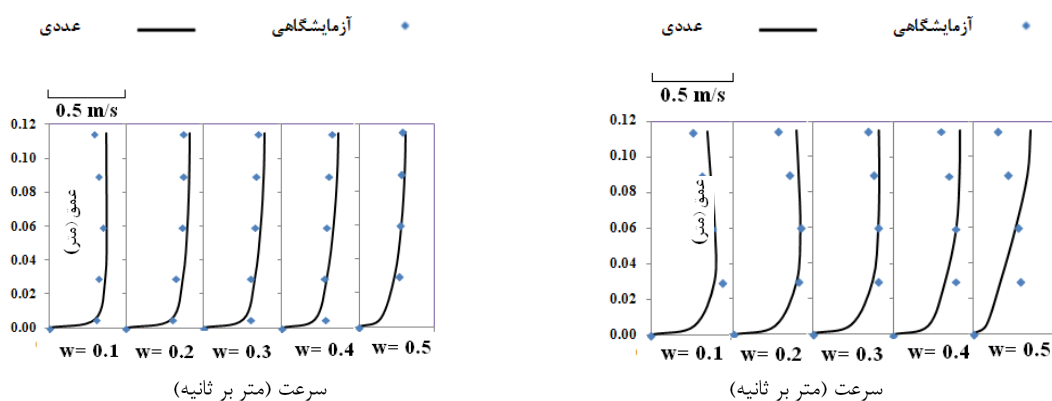
نتایج و بحث

در این قسمت ابتدا نتایج عددی و آزمایشگاهی سرعت طولی در زوایای 40 و 60 درجه که از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به دست آمده‌اند، مقایسه می‌شوند (شکل 5). در تمامی شکل‌هایی که از این پس ارائه می‌شود $w=0$ معرف جداره خارجی و $w=0.6$ بیان‌گر جداره داخلی قوس است. بر اساس نتایج به دست آمده، انطباق نتایج به جز در نزدیکی جداره خارجی و در زاویه 60 درجه که هنوز تأثیر جریان گردابه‌ای و آشفتگی ناشی از آن وجود دارد، به نسبت مناسب است. به‌طور کلی انطباق بین داده‌های آزمایشگاهی و عددی از قوس داخلی به سمت قوس خارجی بهتر می‌شود، بطوریکه اختلاف بین نتایج در قوس داخلی به کم‌ترین میزان می‌رسد. در زاویه 40 درجه در

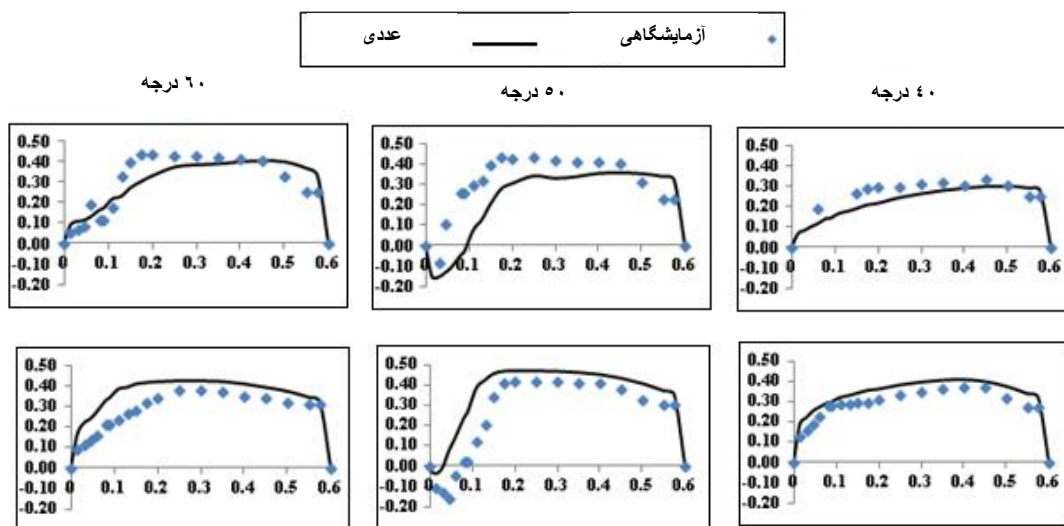
1- Root-mean-square error

جریان رخ می‌دهد. در زاویه 45 درجه که محل استقرار آبشکن است جریان از ناحیه روی آبشکن جدا شده و در ناحیه بین بدنه سازه و جداره خارجی گردابه‌ای را ایجاد می‌کند که در ناحیه جداشدگی جریان در پایین دست واقع شده است. در زاویه 47/5 درجه این گردابه به طور کامل شکل گرفته و با پیش روی در طول قوس و پایان یافتن طول ناحیه جداشدگی پایین دست، ناپدید می‌شود. در زاویه 60 درجه مرکز گردابه در نزدیکی جداره خارجی است و به تدریج مرکز این گردابه از جداره خارجی به سمت میانه کانال هدایت می‌شود. وجود جریان ثانویه در انتهای قوس (مقطع 90 درجه) نشان می‌دهد که جریان‌های ثانویه بعد از قوس هنوز ادامه دارند.

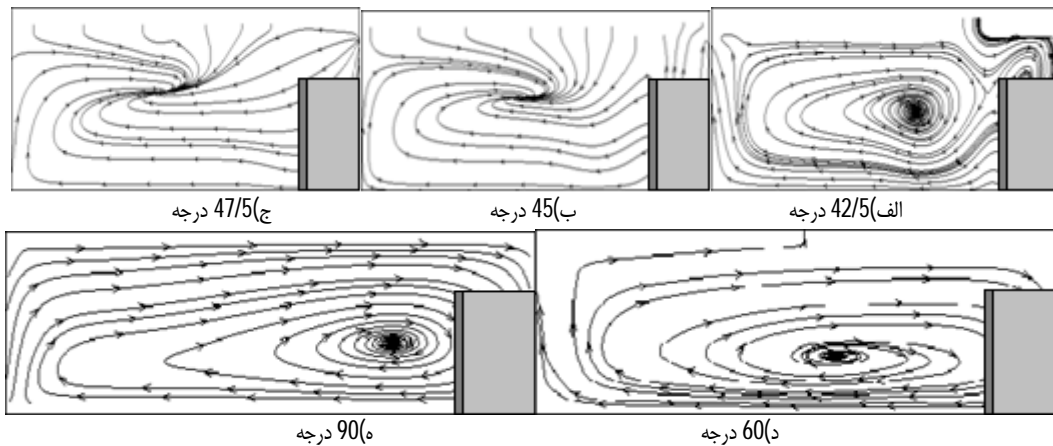
سرعت را ایجاد می‌کنند که تا نقطه اتصال مجدد ، این روند ادامه می‌یابد. حضور سازه آبشکن در مسیر جریان باعث انحراف هسته پرسرعت در کانال می‌گردد. در زوایای 40 و 60 درجه انطباق بین نتایج عددی و آزمایشگاهی به نسبت مناسب بوده و مشاهده می‌شود که در این زوایاها همه مقدار سرعت‌ها مثبت هستند، بنابراین جریان گردابه‌ای بالادست و پایین دست آبشکن به این مقاطع نمی‌رسند. شکل 7 خطوط جریان در مقاطع عرضی را نشان می‌دهد. حضور آبشکن در قوس باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در الگوی حاکم بر گردابه‌ها در مقاطع عرضی می‌شود. همان‌طور که در قسمت 7- الف، جریان‌های ثانویه در زاویه 42/5 درجه یعنی اندکی قبل از آبشکن نشان داده شده است، با برخورد جریان به آبشکن، برگشت



شکل 5- مقایسه سرعت طولی عددی و آزمایشگاهی در عمق و در زوایای: الف) 40، ب) 50 و ج) 60 درجه



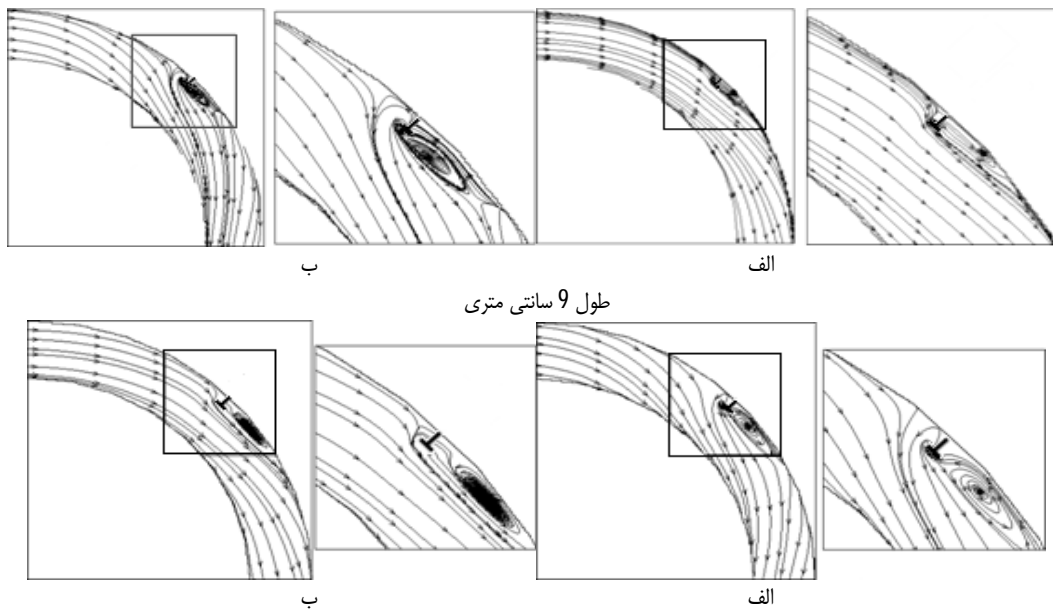
شکل 6- مقایسه سرعت‌های طولی عددی و آزمایشگاهی (متر بر ثانیه) در عرض کانال (متر) در زوایای 40 و 60 درجه در عمق‌های الف) 0/5 سانتی‌متر و ب) 9 سانتی‌متری از کف



شکل 7- نمایش خطوط جریان در مقاطع عرضی حول آبشکن در قوس 90 درجه، الف) 0 درجه، ب) 30 درجه، ج) 42/5 درجه، د) 45 درجه، ه) 47/5 درجه، و) 60 درجه و د) 90 درجه.

برگشتی خواهد بود. با دقت در شکل 8 مشاهده می شود که ابعاد گردابه در پایین دست آبشکن با حرکت در عمق تغییر می کند به این صورت که با حرکت به سمت سطح آزاد، ابعاد آن کوچک تر می شود زیرا سرعت جریان در لایه های نزدیک به سطح نسبت به کف بیش تر است و خطوط جریانی که دارای سرعت بیش تر هستند، تعدادی از خطوط جریان که در ایجاد گردابه نقش دارند را با خود به پایین دست منتقل می کنند.

شکل 8 خطوط جریان حول آبشکن 9 و 15 سانتی متری را در دو لایه الف) 0/5 و ج) 11/5 سانتی متری از کف نمایش داده است. در صفحه نزدیک به سطح آب، خطوط جریان در نزدیکی جداره خارجی پس از برخورد به آبشکن ابتدا به سمت میانه کانال و سپس به طرف جداره خارجی قوس منحرف می شود. با انحراف جریان در بالادست آبشکن، یک جریان پایین رونده نیز ایجاد می گردد. پس از عبور جریان از آبشکن رفتار جریان در پایین دست آن بسیار پیچیده می شود. جریان در این ناحیه ترکیبی از جریان بالارونده، گردابه های سطحی و جریان



شکل 8 - مقایسه خطوط جریان در اطراف آبشکن به ازای تنگ شدگی 15 و 25 درصدی مقطع الف) 0/5 و ب) 11/5 سانتی متری از کف

شدگی های 20 و 25 درصدی، باز هم بیشترین نوسان سطح آب مربوط به بیشترین طول آبشکن است. این امر نشان می‌دهد که با افزایش طول آبشکن و تنگ شدگی مقطع، تغییرات در ناحیه اطراف آبشکن و طول ناحیه جداشدگی بیش‌تر می‌شود به نحوی که پروفیل سطح آب را نیز بیش‌تر تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نتیجه گیری

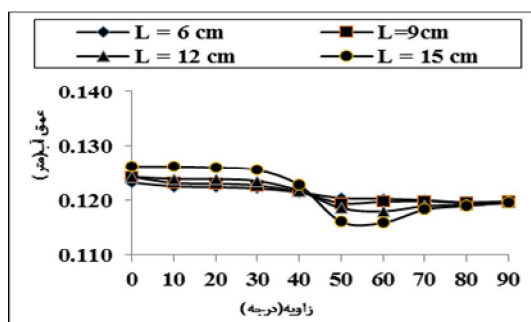
در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D به مطالعه الگوی جریان حول آبشکن T شکل در قوس 90 درجه پرداخته شده و پس از صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی، اثر تنگ شدگی مقطع بر اثر تغییر طول آبشکن بر الگوی جریان بررسی شد. از این بررسی نتایج زیر حاصل شد: انطباق به نسبت مناسب نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نرم‌افزار توانایی لازم در مدل‌سازی جریان حول آبشکن T شکل واقع در کانال قوسی را داراست.

علی‌رغم قوسی بودن مسیر عبور جریان، استفاده از شبکه‌بندی کارترین و مستطیلی در انجام شبیه سازی که یکی از مزایای نرم‌افزار FLOW-3D است، نسبت به استفاده از شبکه‌ی با خطوط منحنی منطبق بر مرزها، به میزان قابل توجهی زمان اجرای برنامه را کوتاه‌تر می‌کند.

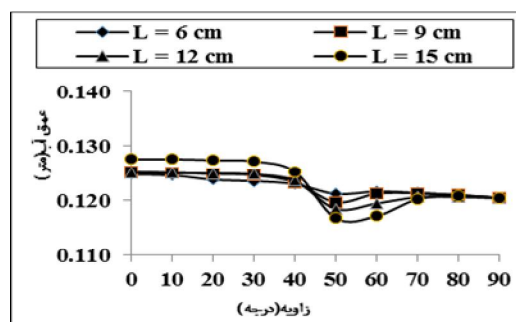
در زاویه 40 درجه که در بالادست آبشکن واقع است و هنوز جریان تحت تأثیر آبشکن نیست، انطباق نتایج بهتر است و در میانه کانال بیش‌ترین انطباق به چشم خورد. به طور کلی حضور آبشکن در قوس باعث منحرف شدن حداکثر سرعت از جداره خارجی به میانه کانال می‌شود که در نمودارهای نشان داده شده این مطلب به وضوح دیده می‌شود.

در نزدیکی بستر که سرعت کم‌تر است، ابعاد گردابه‌ها در کف بزرگ‌تر خواهد بود. همچنین با بررسی اثر تنگ شدگی مقطع به ازای تنگ شدگی های 15 و 25 درصدی، بر الگوی جریان در می‌یابیم که الگوی حاکم بر جریان در هر دو حالت مشابه است اما با افزایش تنگ شدگی در کف و عمق متوسط ابعاد گردابه بزرگ‌تر می‌شود و در نزدیکی سطح آزاد طول ناحیه تحت تأثیر گردابه افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش تنگ شدگی مقطع جریان ابعاد گردابه‌ها در هر دو تراز کف و سطح آزاد بیش‌تر می‌شود و این افزایش در سطح آزاد محسوس‌تر است.

همان‌طور که در شکل 9 ملاحظه می‌گردد پروفیل سطح آزاد به ازای تنگ شدگی های 10، 15، 20 و 25 درصدی مقایسه شده است. از آن‌جا که جریان با برخورد به آبشکن، با یک تنگ‌شدگی در مقطع مواجه می‌شود، عرض کم‌تری را جهت عبور در اختیار خواهد داشت و این در حالی است که دبی جریان ثابت می‌ماند. از این‌رو سطح آب قبل از آبشکن بالا می‌آید. در کلیه شکل‌ها در زاویه 45 درجه یعنی محل قرارگیری آبشکن این نوسان سطح آب دیده می‌شود. پس از عبور جریان از آبشکن، یک کاهش ارتفاع ناگهانی دارد و به تدریج ارتفاع جریان کم‌تر می‌شود تا به حالت یکنواخت برسد. بررسی پروفیل‌ها نشان می‌دهد که در بالادست آبشکن و در نزدیکی جداره خارجی، کم‌ترین ارتفاع مربوط به کم‌ترین تنگ شدگی بوده و بیش‌ترین ارتفاع نیز مربوط به بیش‌ترین تنگ شدگی است. در حالی که در پایین‌دست کم‌ترین ارتفاع مربوط به بیش‌ترین تنگ شدگی است و این نشان می‌دهد که هر اندازه تنگ شدگی بیش‌تر باشد میزان نوسان سطح آب یعنی فاصله بین حداقل و حداکثر ارتفاع سطح آب بیش‌تر می‌شود. در میانه کانال باز همان شرایط حاکم است و در این حالت به دلیل فاصله گرفتن از جداره خارجی، و کاهش تأثیر گردابه‌ها، اندکی از تغییرات و میزان نوسانات سطح آب کاسته می‌شود. برای تنگ



ب



الف

شکل 9- پروفیل سطح آب در طول قوس و در فاصله الف) 30 سانتی‌متری و ب) 55 سانتی‌متری از جداره خارجی به ازای تنگ شدگی های مختلف مقطع

- Gill, M. A. 1972. Erosion and Sand Beds around Spur dikes, *Journal of Hydraulic Division*. 98.9: 78-89.
- Kassem, A.A and Chaudhry, M.H. 2002. Numerical modeling of bed evolution in channel bends, *Journal of Hydraulic Engineering*. 128:507-514.
- Masjedi, A., Shafai Bejestan, M and Moradi, A. 2010. Experimental study on the time development of local scour at a spur dike in a 180° flume bend. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 8. 2: 904-907.
- Mesbahi, J. 1992. On Combined Scour near Groynes in River Bends. M.Sc. Thesis, Delft Hydraulics Report HH 132.
- Naji Abhari, M., Ghodsian, M., Vaghefi, M and Panahpur, N. 2010. Experimental and numerical simulation of flow in a 90 bend. *Flow Measurement and Instrumentation*. 21:292-298.
- Olsen, N.R.B. 2009. Three-dimensional numerical model for simulation of sediment movement in water intakes with multi block option. Department of Hydraulic and environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology. User's manual.
- Perzedwojski, B., Blazejewski, R and Pilarczyk, K.W. 1995. *River Training Techniques: Fundamental, Design and Application*. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherland.
- Rajaratnam, N and Nwachukwu, B.A. 1983. Flow near groin-like structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 109.3: 463-480.
- Roca, M., Vide, J.P.M and Blanckart, K. 2007. Reduction of Bend Scour by an Outer Bank Footing Design and Bed Topography. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133.1: 155-167.
- Solimani, M.M., Attia, K.M., Kotb Talaat, A.M and Ahmed, A.F. 1997. Spur Dike Effects on the River Nile Morphology after High Aswan Dam. *Congress of the International Association of Hydraulic Research, LAHR*. 120.9:125-146.
- Vaghefi, M., Akbari, M and Fiouz, A.R. 2014. Experimental Investigation on Bed Shear Stress Distribution in a 180 Degree Sharp Bend by using Depth-Averaged Method. *International Journal of Scientific Engineering and Technology* 3.7: 962-966.
- Vaghefi, M., Akbari, M and Fiouz, A.R. 2015. 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* 1-12.
- Vaghefi, M., Akbari, M and Fiouz, A.R. 2015. Experimental Investigation of the Three-dimensional Flow Velocity Components in a 180 Degree Sharp
- پروفیل های سطح آزاد نیز بیان گر این مطلب هستند که به علت تنگ شدگی ناشی از حضور آبشکن در مقطع، جریان در بالادست آبشکن بالا رفته و با عبور از آبشکن، با فرار جریان در پایین دست آن کاهش می یابد. بررسی اثر تنگ شدگی مقطع بر سطح آزاد نیز نشان می دهد که هر چه تنگ شدگی بیش تر باشد نوسانات سطح آب بیش تر شده و بیش ترین ارتفاع در بالادست و کم ترین ارتفاع در پایین دست مربوط به آبشکن با طول بال و جان و در نتیجه تنگ شدگی بیش تر است.
- بررسی خطوط جریان در طول قوس نشان داد که ابعاد گردابه ها در بالادست و پایین دست آبشکن در کف بزرگ تر است و با حرکت به سمت سطح از ابعاد آن ها کاسته می شود. هم چنین با افزایش تنگ شدگی مقطع ناحیه تحت تأثیر آبشکن گسترش یافته و گردابه ها در طول بیش تری از قوس در ناحیه پایین دست آبشکن ظاهر شدند.
- با توجه به اینکه اثر شعاع انحنا یکی از پارامترهای بسیار مهم در تعیین الگوی جریان می باشد و به خصوص در قوس تند نیاز است شبکه بندی آن با دقت کافی انجام شود، پیشنهاد می گردد که اثر شعاع انحنا در قوس های تند توام با استقرار آبشکن توسط دیگر محققین مورد مطالعه قرار گیرد.

منابع

- استادی، ف، مجدزاده طباطبایی، م. ر و علی محمدی، س. 1393. بهینه سازی مدل برای طراحی ابعاد آبشکن رودخانه ای و نقش آن برای بهبود مورفولوژی رودخانه، *مجله هیدرولیک*. 9: 4. 72-55.
- صفرزاده، ا. 1383. مطالعه عددی قدرت جریان ثانویه در قوس رودخانه، *سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران*.
- واقفی، م، قدسیان، م. 1388. مطالعه آزمایشگاهی قدرت جریان ثانویه و ورتیسیتی در قوس 90 درجه توام با آبشکن T شکل منفرد. *مجله مهندسی عمران*، 21: 128-111.
- Copeland, R.R. 1983. *Bank Protection Techniques Using Spur Dikes*, Hydraulic Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiments Station Vicksburg Mississippi.
- Elyasi, S., Akhtari, A.A and Seyedashraf, O. 2015. A Numerical Study of the Effect of Submerged Groyne Shapes on Flow Pattern in Straight Open-Channels. *International Bulletin of Water Resources and Development*. 3.1:72-80.
- Fazli, M., Ghodsian, M and Salehi, S.A.A. 2008. Scour and Flow Field around a Spur Dike in 900 Bend. *International Journal of Sediment Research* 23 56-68.

- Engineering and Environmental Science. 38.2: 266-277.
- Wu,W., Rodi,W and Wenka,T. 2000. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 126: 4-15.
- Ye,J and McCorquodale,J.A. 1998. Simulation of curved open channel flows by 3D hydrodynamic model. *Journal of Hydraulic Engineering*. 124:687-698.
- Zhang,H., Nakagawa,H., Kawaike,K and Baba,Y. 2009. Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dyke, *International. Journal of Sediment Research*. 24.1: 33-45.
- Bend. *World Applied Programming*. 5.9: 125-131.
- Vaghefi,M., Ghodsian,M., SalehiNeysaboori,S.A.A. 2009. Experimental study on the effect of a T shaped spur dike length on scour in 90° channel bend. *Arabian Journal for Science and Engineering*.34.2B: 119-126.
- Vaghefi,M., Shakerdargah,M and Akbari,M. 2014. Numerical Study on the Effect of Ratio among Various Amounts of Submersion on Three Dimensional Velocity Components around T-shaped Spur Dike Located in a 90 Degree Bend. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*.3.5: 675-679.
- Vaghefi,M., Shakerdargah,M and Akbari,M. 2015. Numerical investigation of the effect of Froude number on flow pattern around a submerged T-shaped spur dike in a 90° bend. *Turkish Journal of*

Effect of Section Constriction Due to T-shaped Spur Dike in a Bend on Flow Pattern Using FLOW-3D Software

S. Elyasi¹, A. Eghbalzadeh², M. Javan³ and M. Vaghefi^{4*}

Recived: Dec.05, 2015

Accepted: Mar.27, 2016

Abstract

Spur dikes are one of the many kinds of hydraulic structures, and they are employed in stabilizing rivers' outer walls and redirecting the flow. Considering the importance of understanding flow pattern around the spur dikes, the present work firstly simulated the flow pattern around a T-shaped spur dike located in a 90 degree bend channel. The rigid-bed channel's curvature radius and radius to width ratio were respectively 2.4 and 4. FLOW-3D was used in order to simulate the flow pattern, and the effect of section constriction on the flow pattern was studied afterwards. VOF was used for distinguishing the water surface profile from the open surface model, and RNG $k-\epsilon$ turbulence model was employed to model the turbulent flow around the spur dike. The piece of research indicated an acceptable correspondence between numerical and experimental results. The results obtained through various simulations per 10, 20 and 25% constrictions of the section indicated that increase in section constriction would increase the water surface fluctuations, and the maximum height upstream and the minimum height downstream were observed in the case of the large spur dike. In addition, the vortices appear over a longer area of the bend, downstream the spur dike.

Key Words: Flow Pattern, FLOW-3D, Numerical Simulation, 90 Degree Bend

1- M.Sc. Student of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah

2,3- Assistant Professor of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah

4- Associate Professor of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr

(*-Corresponding Author Email: Vaghefi@pgu.ac.ir)