

## مقدمه

استفاده از آبشکن‌ها در تثبیت سواحل از جمله راه‌های مؤثر در پایداری دیواره رودخانه‌ها می‌باشد، اما وجود آبشکن‌ها در مسیر جریان، باعث ایجاد آبشستگی موضعی می‌گردد. رسوبات خروجی از اطراف آبشکن می‌تواند تأثیر زیادی بر توپوگرافی بستر رودخانه‌ها، خصوصاً در پایین‌دست محل استقرار آبشکن داشته باشد [۱۸]. هنگامی که از آبشکن‌ها برای محافظت جداره‌ی رودخانه در قوس‌ها و یا برای اهدافی دیگر نظیر حفظ الگوی جریان استفاده می‌گردد، تحلیل جریان در اطراف آبشکن‌های استفاده شده در قوس خارجی بسیار پیچیده‌تر می‌گردد که علت آن اندرکنش بین الگوی جریان در قوس و الگوی جریان اطراف آبشکن و تأثیر جریان‌های حلزونی در قوس‌ها می‌باشد [۱۹]. به دلیل اهمیت موضوع الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن‌ها، از زمان‌های گذشته تاکنون مطالعات زیادی در این مورد انجام شده که در ادامه به ذکر خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته پرداخته می‌شود.

چن و ایکدا [۲] مطالعات فراوانی در ارتباط با الگوی جریان حول تک آبشکن در مسیر مستقیم انجام دادند. آن‌ها به مطالعه آزمایشگاهی تشکیل، توسعه و انتقال چرخابه‌های افقی در اطراف دماغه آبشکن پرداخته و نتیجه گرفتند که چرخابه‌های گذرایی از نوک آبشکن جدا شده و به صورت متناوب به سمت پایین دست منتقل می‌شوند. کوهنل و همکاران [۸] با مطالعاتی که بر روی حداکثر عمق حفره‌ی آبشستگی در کانال مستقیم انجام دادند به این نتیجه رسیدند که در جریان‌های با عمق کم، حداکثر عمق آبشستگی در دماغه‌ی آبشکن شکل گرفته و با افزایش عمق جریان این مکان به سمت وسط آبشکن حرکت می‌کند. اتما و مستو [۴] آزمایشاتی را در یک کانال مستقیم با بستر صلب و پهنای ثابت به منظور تعیین اثر حضور آبشکن بر الگوی جریان و تعیین نواحی جداشدگی در بالادست و پایین دست انجام دادند. آن‌ها به وقوع ناحیه چرخشی در بالادست، ناحیه جداشدگی و چرخشی بزرگ در پایین دست و نیز گردابه‌های آشفته‌گی حاصل از نوسانات لایه برشی اشاره نمودند. ناگاتا و همکاران [۱۱] به شبیه‌سازی عددی الگوی جریان سه بعدی پیرامون تک آبشکن با بستر متحرک پرداخته و ضمن تحلیل ساختار جریان متوسط ارتباط آن را با نحوه وقوع و توسعه حفره آبشستگی مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که با وقوع حفره آبشستگی، جریان‌های چرخشی و جریان برگشتی نزدیک کف نیز تشدید می‌شود. فضلی و همکاران [۵] به بررسی آزمایشگاهی الگوی

 مطالعه عددی الگوی جریان و آبشستگی ناشی از  
 آبشکن‌های سری سرسپری

 محمد واقفی<sup>۱</sup>، یاسر صفرپور<sup>۲</sup>، مریم اکبری<sup>۲</sup>

## چکیده

در این مقاله به بررسی تغییرات الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن‌های سری سرسپری مستقر در قوس ۹۰ درجه ملایم پرداخته شده است. شبیه‌سازی الگوی جریان و آبشستگی با هفت مدل‌سازی مجزا در کانال با وجود یک آبشکن و همچنین با وجود آبشکن‌هایی به فاصله‌های ۲٫۵، ۳٫۵ و ۵ برابر طول آبشکن از هم در حالت‌های غیرمستغرق و مستغرق (با ۲۵ درصد استغراق) با استفاده از مدل عددی انجام شده است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی در حالت غیرمستغرق و منفرد انجام شده که تطابق داده‌های عددی و آزمایشگاهی بیانگر عملکرد مناسب مدل عددی SSIIM در مدل‌سازی الگوی جریان و آبشستگی در کانال‌های قوسی می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان دهنده این است که ابعاد و محل تشکیل گردابه‌ها و همچنین میزان آبشستگی با تغییر فاصله‌های بین آبشکن‌ها و نسبت استغراق آبشکن‌ها تغییر می‌کند؛ به گونه‌ای که در حالت مستغرق با افزایش فاصله بین آبشکن‌ها، میزان آبشستگی و رسوب‌گذاری بیشینه افزایش یافته در حالی که با افزایش استغراق آبشکن، از میزان بیشینه آبشستگی و رسوب‌گذاری کاسته شده و میزان بیشینه قدرت جریان ثانویه نیز که در بالادست آبشکن اول روی می‌دهد ۴۵٫۳۵ درصد کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با استغراق ۲۵ درصدی آبشکن‌ها، آبشستگی بیشینه در محدوده آبشکن سوم تا خروجی قوس به وقوع می‌پیوندد.

**کلید واژه‌ها:** مدل SSIIM، آبشکن سرسپری، آبشکن‌های سری، آبشستگی، استغراق

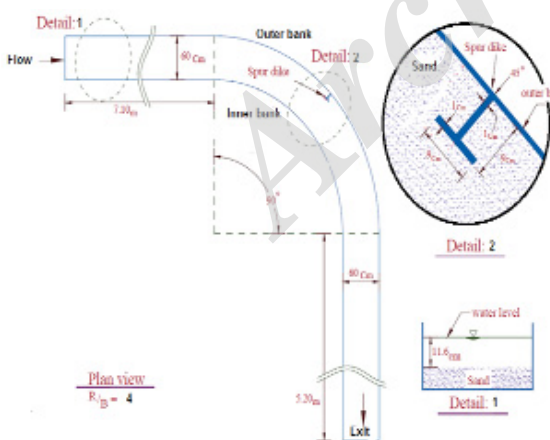
۱- نویسنده مسئول و دانشیار سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، پست الکترونیک: vaghefi@pgu.ac.ir  
 ۲- دانش آموزانه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

آبشکن‌های سرسپری در قوس، تاکنون تاثیر این آبشکن‌ها به صورت سری در کانال‌های قوسی مورد بررسی قرار نگرفته است. به همین دلیل در این تحقیق، تاثیر فاصله بین آبشکن‌های سری سرسپری و استغراق سری آبشکن‌ها بر الگوی جریان و رسوب در یک قوس ملایم ۹۰ درجه (انحنای نسبی معادل با ۴) مورد مطالعه قرار گرفته و نقش فاصله آبشکن‌ها در تغییرات توپوگرافی بستر و تشکیل گردابه‌ها بررسی شده است.

## مواد و روش‌ها

### مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های مورد نظر توسط واقفی و همکاران در کانالی با قوس ۹۰ درجه با دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس تهران انجام گرفت. این کانال از یک قسمت مستقیم به طول ۷٫۲ متر در بالادست و همچنین قسمت مستقیمی به طول ۵٫۱ متر در پایین‌دست تشکیل شده که این دو مسیر مستقیم توسط قوس ۹۰ درجه به شعاع انحنای خارجی ۲٫۷ متر به هم متصل گردیده‌اند. کانال از جنس شیشه ساخته شده است که توسط قاب‌های فولادی، پایداری آن حفظ می‌گردد. نسبت شعاع قوس به عرض کانال برابر با ۴ و ارتفاع آن ۷۰ سانتیمتر و عرض آن ۶۰ سانتیمتر است. کف کانال از رسوباتی با قطر متوسط ۱٫۲۸ میلی‌متر با انحراف معیار ۱٫۳ تا عمق ۳۵ سانتی‌متر پوشیده شده است. آبشکن‌ها به صورت صفحات مستطیلی با پلان T شکل و از جنس پلکسی گلاس ساخته شده و ضخامت آن‌ها یک سانتی‌متر می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری مولفه‌های سرعت در آزمایشگاه نیز از دستگاه سرعت سنج سه بعدی Vectrino استفاده شده است. در شکل ۱ به صورت شماتیک نمایی از کانال و آبشکن مستقر در آن به همراه خصوصیات آن‌ها نشان داده شده است.



شکل ۱- کانال آزمایشگاهی و آبشکن مستقر در آن

Figure 1. Laboratory channel and spur dike

جریان و آبشستگی پیرامون یک آبشکن تیغه‌ای مستقر در قوس ۹۰ درجه که در موقعیت‌های مختلف در قوس قرار گرفته بود، پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش موقعیت استقرار آبشکن در طول قوس، طول ناحیه جدایی جریان افزایش یافته در حالی که طول ناحیه بازگشتی کاهش می‌یابد. کوکن و کانستینسو [۷] علاوه بر مطالعه در مورد ساختار جریان حول تک آبشکن به بررسی تاثیر بستر توسعه یافته بر روند شکل‌گیری جریان‌های گردابه‌ای و نیز توزیع تنش برشی بستر پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که ساختار گردابه نعل اسبی در حالت بستر تخت پایدارتر از حالت بستر توسعه یافته بوده است. مسجدی و همکاران [۹ و ۱۰] به مطالعه آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای موقعیت آبشکن، عدد فرود و طول بال آبشکن سرسپری مستقر در قوس ۱۸۰ درجه ملایم در شرایط آب زلال پرداختند. نتایج مشاهده‌های آن‌ها بیانگر این است که با افزایش طول بال آبشکن و عدد فرود، میزان آبشستگی افزایش یافته و همچنین عمق آبشستگی در موقعیت ۶۰ درجه نیز افزایش یافته است. کنگ و همکاران [۶] به بررسی آزمایشگاهی خصوصیات جریان پیرامون آبشکن سرکج در مسیر مستقیم پرداختند و نتیجه گرفتند که افزایش سرعت در بالادست آبشکن بیشتر از پایین دست آبشکن می‌باشد. ژیا فنگ و همکاران [۲۸] الگوی جریان آشفته پیرامون تک آبشکن با هندسه متفاوت را مورد مطالعه قرار دادند. مشاهده آن‌ها بیانگر این بود که بیشترین شدت آشفته‌گی پیرامون آبشکن دوزنقه‌ای به وقوع می‌پیوندد. دهقانی و همکاران [۳] به مطالعه آزمایشگاهی آبشستگی پیرامون آبشکن‌های سری L شکل در شرایط آب زلال در مسیر مستقیم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان آبشستگی در اطراف آبشکن L شکل کمتر از آبشکن مستقیم می‌باشد. آچاریا و همکاران [۱] به شبیه‌سازی سه بعدی الگوی جریان آشفته پیرامون سری آبشکن‌های تیغه‌ای در بستر ثابت و متحرک Flow-3D پرداختند. آن‌ها از مدل آشفته‌گی k-ε برای مدل‌سازی استفاده نمودند و نتایج حاصل از مدل‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. واقفی و همکاران [۱۸-۲۲] به بررسی‌های آزمایشگاهی فراوانی در مورد الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن سرسپری غیرمستغرق در قوس ۹۰ درجه تحت تاثیر پارامترهای مختلفی از جمله: عدد فرود، شعاع انحنای، هندسه بال آبشکن، طول بال و جان آبشکن، موقعیت آبشکن و ... پرداختند. نتایج آن‌ها بیانگر این است که محل وقوع حداکثر عمق آبشستگی در فاصله ۱۰ تا ۲۰ درصد طول آبشکن و در بالادست آبشکن می‌باشد. علاوه بر این افزایش طول آبشکن، کاهش طول بال آبشکن، افزایش عدد فرود و تغییر موقعیت آبشکن به سمت پایین‌دست قوس باعث افزایش ابعاد چاله آبشستگی می‌گردد. واقفی و همکاران [۱۶ و ۲۳-۲۷] در سال‌های اخیر نیز به صورت عددی به مطالعه پارامترهای موثر بر الگوی جریان و آبشستگی پیرامون آبشکن‌های سرسپری (T شکل) با استفاده از نرم‌افزارهای Flow-3D و SSIIM پرداخته‌اند.

با توجه به مطالعات عددی صورت گرفته در مورد کاربرد

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\delta 1} \frac{\varepsilon}{\kappa} P_k + C_{\delta 2} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (6)$$

در معادله‌های بالا، در مدل  $k-\varepsilon$  مقادیر ثابت به صورت زیر می‌باشند:

$$\sigma_\varepsilon = 1.3 \quad C_{\delta 1} = 1.4 \quad C_{\delta 2} = 1.9$$

برای محاسبه‌های رسوب از روابط فان راین [۱۳] استفاده شده است. رابطه فان راین برای غلظت تعادلی رسوب نزدیک بستر به شکل معادله (۷) می‌باشد:

$$C_{bed} = 0.015 \frac{d^{0.3} \left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{\left[ \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right]^{0.1}} \quad (7)$$

علاوه بر بار معلق، بار بستر ( $q_b$ ) نیز به وسیله رابطه فان راین طبق معادله (۸) محاسبه می‌شود:

$$\frac{q_b}{D_b^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w}}} = 0.053 \frac{\left[ \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right]^{1.5}}{D_b^{0.3} \left[ \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\rho_w v^2} \right]^{0.1}} \quad (8)$$

که در این روابط،  $d$ : قطر ذرات رسوب بر حسب سانتی‌متر،  $a$ : یک سطح مرجع معادل با ارتفاع زبری بر حسب سانتی‌متر است،  $\tau$ : تنش برشی کف بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع،  $\tau_c$ : تنش برشی بحرانی بستر برای حرکت ذرات رسوب بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع،  $\rho_s$  و  $\rho_w$ : چگالی آب و رسوب بر حسب سانتی‌متر مکعب،  $v$ : لزجت بر حسب سانتی‌متر مربع بر ثانیه و  $g$ : شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه است.

#### شرایط اولیه مدل‌سازی عددی

تمامی پارامترهای مورد استفاده در مدل عددی (عمق، دبی، ضخامت کف، قطر رسوبات و ...) کاملاً مشابه مدل آزمایشگاهی بوده است. زمان اجرای تحلیل ۲۴ ساعت در نرم‌افزار معرفی گردیده است. جانمایی سایر آبشکن‌ها در ساحل خارجی بر اساس جدول (۱) می‌باشد که بر اساس زاویه در قوس نشان داده است. در این مقاله ابتدا یک مدل‌سازی برای مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی موجود در حالت غیرمستغرق انجام شده است. سپس ۶ مدل‌سازی دیگر در حالت مستغرق و غیرمستغرق در فاصله‌های مختلف استقرار آبشکن‌ها از هم انجام شده است.

مزیت اصلی مدل SSIIM<sup>۱</sup> در مقایسه با سایر مدل‌های CFD<sup>۲</sup> توانایی شبیه‌سازی انتقال رسوب در بستر متحرک برای هندسه‌های پیچیده است. متوسط‌گیری زمانی باعث اضافه شدن ترمی جدید به معادله‌های ناویر استوکس شده که بیانگر آشفته‌گی جریان می‌باشد لذا برای به دست آوردن ترم‌های آشفته‌گی در معادلات ناویر استوکس از مدل آشفته‌گی  $k-\varepsilon$  استفاده شده است. SSIIM معادله‌های ناویر استوکس را با مدل آشفته‌گی استاندارد بر روی یک شبکه سه بعدی تقریباً نامتعامل حل می‌کند. برای منفصل‌سازی نیز از روش حجم کنترل به همراه الگوریتم توانی یا الگوریتم جهتمند مرتبه دوم استفاده می‌کند. در این نرم‌افزار از روش SIMPLE<sup>۳</sup> جهت ارتباط ترم فشار و سرعت استفاده می‌شود و با استفاده از میدان سرعت و با حل معادله پیوستگی رسوب به محاسبه تغییرات بستر می‌پردازد. معادلات ناویر استوکس برای سیالات تراکم ناپذیر با چگالی ثابت در حالت برداری به فرم معادله (۱) می‌باشد:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (-P \delta_{ij} - \rho u_i u_j) \quad (1)$$

که  $x$  بیانگر فاصله و  $U$  بیانگر سرعت در سه جهت هستند،  $P$  نشانگر فشار کل و  $\delta_{ij}$  دلتای کرونگر می‌باشد که در حالت  $\mathbf{i} = \mathbf{j}$  برابر واحد و در غیر این صورت صفر می‌باشد. در رابطه فوق، ترم اول سمت چپ ترم‌گذار (تغییرات زمانی) و ترم بعدی ترم جابجایی می‌باشد. اولین ترم سمت راست ترم فشار و ترم بعدی مربوط به تنش رینولدز است، جهت ارزیابی ترم اخیر به یک مدل آشفته‌گی نیاز می‌باشد.

تنش‌های رینولدزی بر اساس معادله (۲) و لزجت گردابی بر اساس معادله (۳) بدست می‌آیند:

$$-u_i u_j = \nu_T \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2)$$

$$\nu_T = c_\mu \frac{k}{\varepsilon} \quad (3)$$

در معادلات فوق،  $k$ : انرژی جنبشی جریان می‌باشد و  $P_k$  و  $\varepsilon$  (افت انرژی جنبشی) بصورت معادله‌های (۴) تا (۶) مدل می‌شوند

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (4)$$

$$P_k = \nu_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

1. Sediment Simulation In Intakes with a Multi block option
2. Computational fluid dynamics
3. Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations

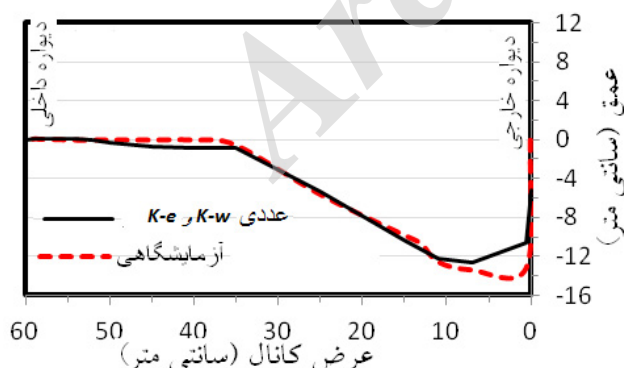
جدول ۱- مکان قرارگیری آبشکن‌ها بر حسب درجه از شروع قوس در فاصله‌های مختلف

Table 1- The position of spur dikes in bend according to degree from the beginning of bend at different distances

فاصله بین آبشکن‌ها	۲/۵ برابر طول آبشکن		۳/۵ برابر طول آبشکن		۵ برابر طول آبشکن	
The distance between spur dikes	2.5 times of spur dike length		3.5 times of spur dike length		5 times of spur dike length	
موقعیت آبشکن از ورودی قوس	آبشکن دوم	آبشکن سوم	آبشکن دوم	آبشکن سوم	آبشکن دوم	آبشکن سوم
Spur dikes location from the be entry	Second dike	Third dike	Second dike	Third dike	Second dike	Third dike
	49.9	54.7	51.8	58.6	54.7	64.4

دست آبشکن برای هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، سرعت‌های جریان (در مقاطع بالادست و پایین دست آبشکن) و همچنین پروفیل‌های بستر ناشی از آبشستگی، در مقاطع نزدیک به محل استقرار آبشکن در این دو بسیار به هم نزدیک بوده و نتایج عددی و آزمایشگاهی از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشند. که این موضوع بیانگر توانایی بالای این مدل عددی در تعیین الگوی جریان و آبشستگی در کانال‌های قوسی توام با سازه‌های هیدرولیکی مانند آبشکن می‌باشد.

مدل‌های آشفستگی مختلفی جهت مدل عددی بررسی گردیده اند که برای به دست آوردن ترم های آشفستگی در معادلات ناویر-استوکس در این تحقیق از میان مدل‌های آشفستگی مختلفی که در مدل عددی SSIIM کدگذاری شده اند از مدل آشفستگی  $k-\epsilon$  استفاده شده است. مدل آشفستگی  $k-\omega$  معمولاً پخش آشفستگی کمتری نسبت به مدل آشفستگی  $k-\epsilon$  را نشان می‌دهد که منجر می‌شود ابعاد و طول ناحیه بازگشتی جریان بیشتر پیش‌بینی شوند [۱۵]. لذا با مقایسه دو مدل آشفستگی و عدم پیچیده بودن مدل‌سازی‌های این تحقیق، بر اساس شکل‌های شماره ۲ و ۳ مشاهده شد که نتایج میزان توپوگرافی بستر مدل عددی با مدل‌های آشفستگی مختلف ( $k-\epsilon$  و  $k-\omega$ ) بر هم منطبق هستند و تفاوتی ندارند.



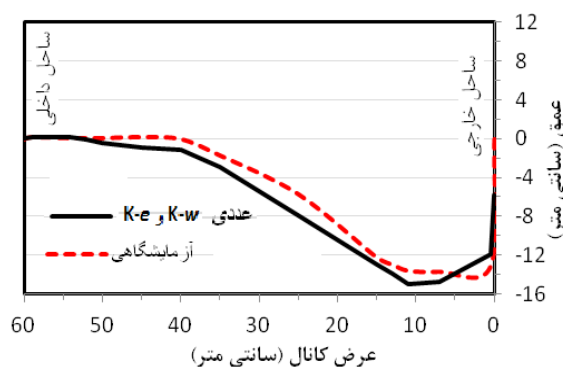
شکل ۳- مقایسه عددی و آزمایشگاهی پروفیل عرضی بستر در زاویه ۴۲٫۵ درجه

Figure 3. Comparison of experimental and numerical bed lateral profile at 42.5 degree

شرایط مرزی و شبکه‌بندی در این شبیه‌سازی مقدار دبی در مرز ورودی معرفی شده و گرادیان کلیه پارامترها نیز در مرز خروجی صفر می‌باشد. مقدار دبی خروجی در شرایط مرزی خروجی معرفی گردیده است. گرادیان  $\epsilon$  در سطح آب صفر و مقدار  $k$  نیز در سطح آب صفر منظور شده است. شار عبوری از کف و دیوار نیز برابر با صفر می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده برای دریافت نتایج دقیق‌تر، از شبکه ریز مش‌بندی شده شامل ۶۵ مقطع شعاعی (عرضی)، ۳۶ مقطع طولی و ۲۶ مقطع ارتفاعی (عمقی) استفاده شده است. شبکه‌بندی در عمق غیریکنواخت بوده و در نزدیکی کف و سطح آب نیز از مش ریزتر استفاده شده است.

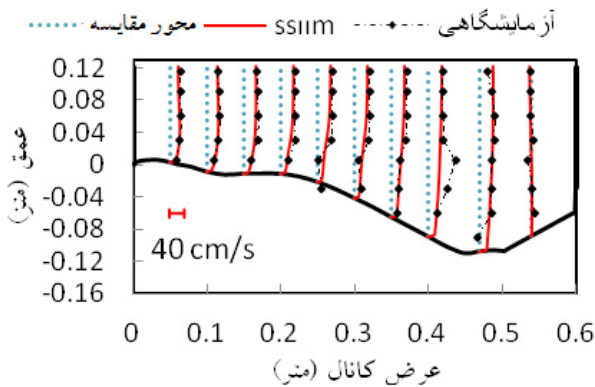
اعتبار سنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

برای استفاده از مدل عددی در ابتدا باید این مدل با یک مدل آزمایشگاهی کالیبره گردد و توانایی و میزان خطاهای مدل طی مقایسه با مدل مشابه آزمایشگاهی مشخص شود. جهت اعتبارسنجی این مدل از نتایج آزمایشگاهی که توسط واقفی و همکاران [۲۲] انجام شده است، استفاده شد. شکل های ۲-۵ نمونه‌هایی از توپوگرافی بستر و مقایسه سرعت‌های جریان را در بالادست و پایین



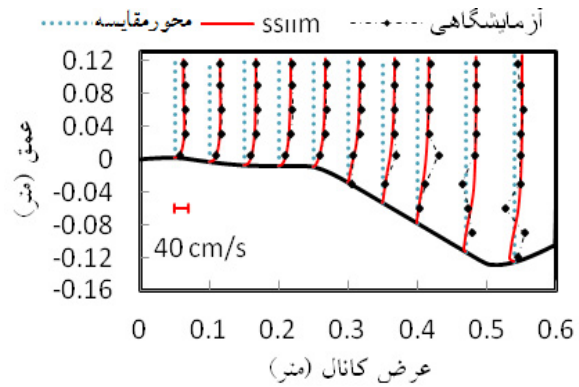
شکل ۲- مقایسه عددی و آزمایشگاهی پروفیل عرضی بستر در زاویه ۴۳٫۷۵ درجه

Figure 2. Comparison of experimental and numerical bed lateral profile at 43.75 degree



شکل ۵- مقایسه عددی و آزمایشگاهی سرعت طولی در زاویه ۴۶٫۲۵ درجه

Figure 5. Comparison of experimental and numerical longitudinal velocity at 46.25 degree



شکل ۴- مقایسه عددی و آزمایشگاهی سرعت طولی در زاویه ۴۲٫۵ درجه

Figure 4. Comparison of experimental and numerical longitudinal velocity at 42.5 degree

بر چاله‌های آبشستگی مذکور، یک چاله آبشستگی در جوار بال خارجی آبشکن سوم تشکیل می‌گردد که دلیل آن نزدیکی آبشکن سوم به منطقه رسوب‌گذاری ساحل داخلی می‌باشد. دلیل تشکیل منطقه رسوب‌گذاری ساحل داخلی به دلیل کم بودن تنش برشی در این ناحیه است و به دلیل ایجاد تپه‌های رسوبی و تاثیر جریان ثانویه، چاله آبشستگی مقابل منطقه رسوب‌گذاری ایجاد می‌شود.

در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب آبشستگی بیشینه در نزدیکی بالادست بال آبشکن اول ایجاد شده و میزان بیشینه آبشستگی و رسوب‌گذاری تغییر خاصی نکرده ولی وقتی  $S=5L$  می‌باشد، آبشستگی بیشینه در انتهای کانال و در چاله آبشستگی خروجی قوس اتفاق می‌افتد و میزان آبشستگی و رسوب‌گذاری بیشینه نیز از سایر حالات بیشتر می‌باشد.

با استغراق ۲۵ درصدی آبشکن‌ها بر اساس شکل‌های ۶-د تا ۶-و در تمام فواصل بین آبشکن‌ها، با اینکه چاله آبشستگی در بالادست آبشکن اول وجود دارد ولی آبشستگی بیشینه در نزدیکی آبشکن اول روی نمی‌دهد بلکه در محدوده آبشکن سوم تا خروجی قوس اتفاق می‌افتد زیرا با عبور جریان از تراز بالای آبشکن‌ها، میزان شدت گردابه‌های مخرب در برابر تاثیر جریان ثانویه پایین دست آبشکن سوم کمتر بوده و وجود تنش برشی بیشینه منجر می‌گردد که آبشستگی بیشینه در این منطقه روی دهد. فاصله مرکز چاله آبشستگی بیشینه از انتهای قوس بر اساس جدول ۲ تغییر می‌یابد. با مقایسه شکل‌های حالات مستغرق و غیرمستغرق بر اساس جدول ۳ مشاهده می‌گردد که بیشینه آبشستگی و رسوب‌گذاری با استغراق آبشکن کاهش می‌یابد. در حالت مستغرق با افزایش فاصله بین آبشکن‌ها بر حسب جدول ۴ میزان آبشستگی و رسوب‌گذاری بیشینه، افزایش می‌یابد. در شکل ۷، پروفیل طولی بستر برای فاصله های ۰/۸ و ۱۲ درصدی عرض کانال از ساحل خارجی (d): نشان داده شده است. در نزدیکی ساحل خارجی

قدرت جریان ثانویه

از خصوصیات جریان در کانال‌های قوسی تشکیل جریان ثانویه ناشی از اندرکنش جریان عرضی و نیروی گریز از مرکز است. برای محاسبه قدرت جریان ثانویه از روش شکری [۱۷] استفاده شده است. شکری با بررسی جریان در مسیرهای قوسی ضمن تشریح مکانیسم جریان ثانویه، جهت بحث کمی بر روی این پدیده، معیار زیر را برای قدرت جریان ثانویه معرفی کرده است:

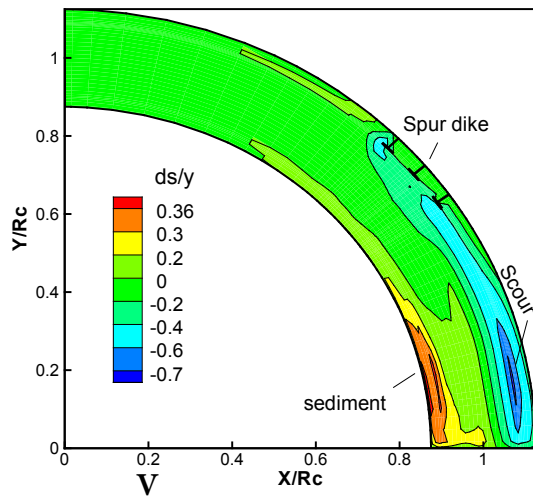
$$S_x = \frac{K_{lateral}}{K_{main}} \quad (9)$$

این معیار در یک مقطع عرضی معین عبارت است از نسبت انرژی جنبشی جریان جانبی به انرژی جنبشی جریان اصلی. در معادله فوق  $S_x$  بیانگر قدرت جریان ثانویه،  $K_{lateral}$  و  $K_{main}$  به ترتیب نشان‌دهنده انرژی جنبشی جریان جانبی و انرژی جنبشی جریان اصلی می‌باشند.

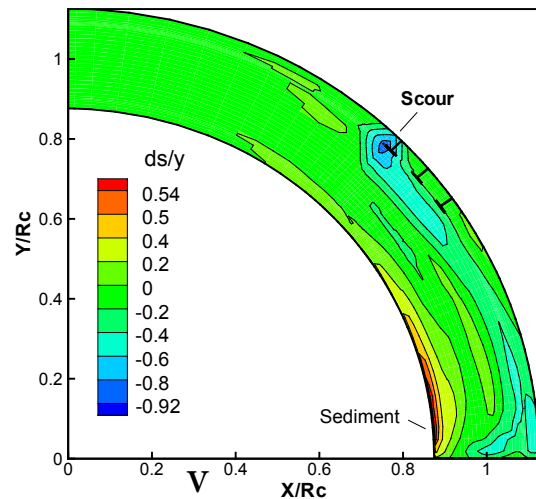
## نتایج و بحث

توپوگرافی بستر

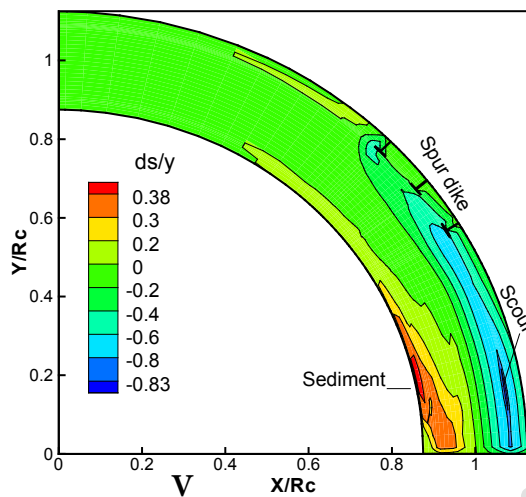
در این قسمت سری سه تایی آبشکن‌های سرسپری با فواصل ۲/۵، ۳/۵ و ۵ برابر طول آبشکن (L) از یکدیگر تحلیل شده و نتایج نشان می‌دهد که پدیده آبشستگی بواسطه پارامترهایی مانند تنش برشی بستر، جریان‌های عرضی و ثانویه و گردابه‌های مخرب ایجاد می‌گردد. در شکل‌های ۶-الف تا ۶-ج، توپوگرافی بستر کانال بر اساس فاصله بین آبشکن‌ها (S)، نشان داده شده است. در تمام حالات یک چاله آبشستگی در انتهای قوس و در نزدیکی ساحل خارجی تشکیل می‌گردد و رسوب‌گذاری بیشینه نیز در نزدیکی انتهای قوس و ساحل داخلی اتفاق می‌افتد. با افزایش فاصله بین آبشکن‌ها، چاله آبشستگی به سمت پایین دست قوس گسترش می‌یابد. وقتی که آبشکن‌ها به فاصله ۵ برابر طول آبشکن از هم قرار می‌گیرند علاوه



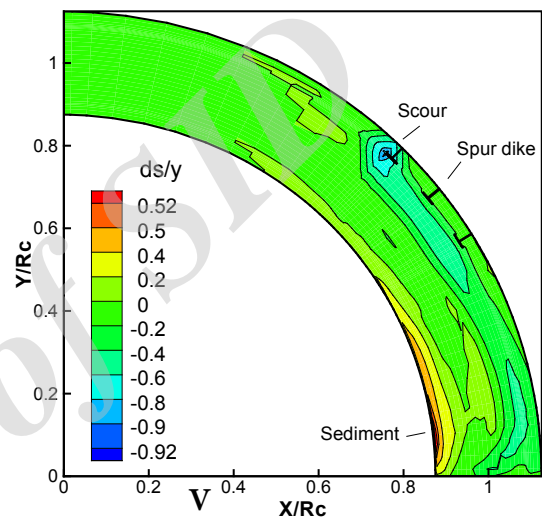
(د) (د)



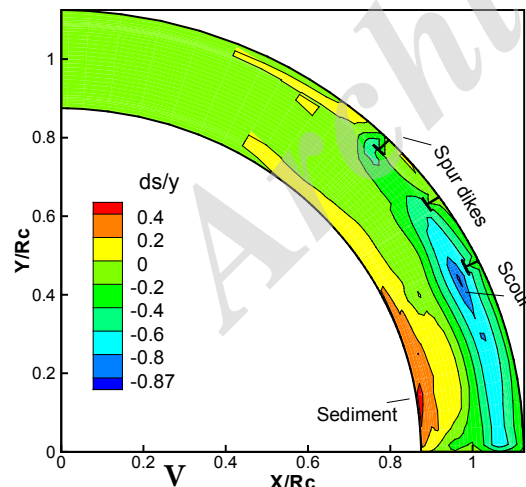
(الف) (ا)



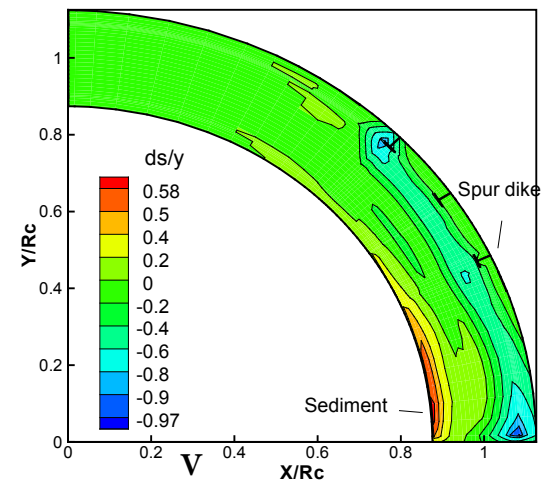
(ه) (ب)



(ب) (ب)



(و) (د)



(ج) (ج)

شکل ۶- توپوگرافی بستر برای حالت های: (الف)  $S=2.5L$  غیر مستغرق (ب)  $S=3.5L$  غیر مستغرق (ج)  $S=5L$  غیر مستغرق (د) آبشکن مستغرق  $S=2.5L$  (ه)  $S=3.5L$  آبشکن مستغرق (و)  $S=5L$  آبشکن مستغرق

Figure 6. Bed topography for cases: a)  $S=2.5L$  (non-submerged), b)  $S=3.5L$  (non-submerged), c)  $S=5L$  (non-submerged), d)  $S=2.5L$  (submerged), e)  $S=3.5L$  (submerged), and f)  $S=5L$  (submerged)

بزرگنمایی این پروفیل در حد فاصل زوایه‌های ۳۵ تا ۷۰ درجه از بالادست قوس در شکل ۷-ج نشان داده شده است. در این شکل مقاطع آبشکن‌ها در فاصله‌های مختلف ترسیم شده و میزان آبشستگی‌های بالادست و پایین دست آبشکن‌ها مشهود است. پروفیل بستر در نزدیکی رویه خارجی بال آبشکن در شکل ۷-د ارائه شده است و آبشستگی بیشینه در خروجی قوس در حالت  $S=5L$ ، قابل مشاهده است. شکل ۷-ه پروفیل نزدیک ساحل داخلی و رسوب‌گذاری در این ناحیه را نشان می‌دهد که در تمام فاصله‌های بین آبشکن‌ها از روند ثابتی برخوردار است.

(مطابق شکل ۷-الف) در تمام فواصل آبشکن‌ها، میزان آبشستگی ناشی از آبشکن اول با هم برابر بوده ولی عمق چاله آبشستگی خروجی قوس در حالت  $S=5L$ ، بیشتر می‌باشد. در نزدیکی جان آبشکن‌ها، هیچ‌گونه آبشستگی اتفاق نیفتاده است. پروفیل نزدیک به بال داخلی آبشکن (شکل ۷-ب) نشان می‌دهد که بالادست و پایین دست جان آبشکن‌ها دارای آبشستگی شده که در حالت  $S=5L$  و در محل آبشکن سوم دارای بیشترین مقدار بوده و معادل  $31/8$  درصد آبشستگی بیشینه است. دلیل این موضوع عدم تاثیر چاله آبشستگی آبشکن اول در این فاصله و نزدیکی به تپه‌های رسوب‌گذاری است.

جدول ۲- فاصله بی‌بعد مرکز چاله آبشستگی از انتهای قوس

Table 2. The dimensionless distance of scour hole center from the end of bend

فاصله بین آبشکن‌ها The distance between spur dikes	۲/۵ برابر طول آبشکن 2.5 times of spur dike length	۳/۵ برابر طول آبشکن 3.5 times of spur dike length	۵ برابر طول آبشکن 5 times of spur dike length
فاصله بین چاله آبشستگی از انتهای قوس The distance of scour hole from the end of bend	۴/۴ برابر طول آبشکن 4.4 times of spur dike length	۴/۲ برابر طول آبشکن 4.2 times of spur dike length	۱۱/۵۶ برابر طول آبشکن 11.56 times of spur dike length

جدول ۳- مقایسه توپوگرافی بستر در حالت آبشکن مستغرق نسبت به حالت آبشکن غیر مستغرق

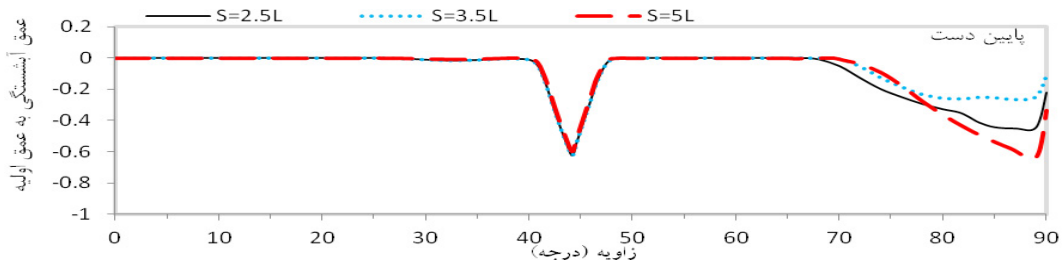
Table 3. The comparison of bed topography in cases of non-submerged and submerged

تغییرات فاصله بین آبشکن‌ها Changing of distance between dikes	۲/۵ برابر طول آبشکن 2.5 times of spur dike length	۳/۵ برابر طول آبشکن 3.5 times of spur dike length	۵ برابر طول آبشکن 5 times of spur dike length
کاهش بیشینه آبشستگی (%) کاهش بیشینه رسوب‌گذاری (%)	Reduction of maximum scouring (%) 23.91	9.78	10.31
Reduction of maximum sedimentation (%)	33.33	26.92	31

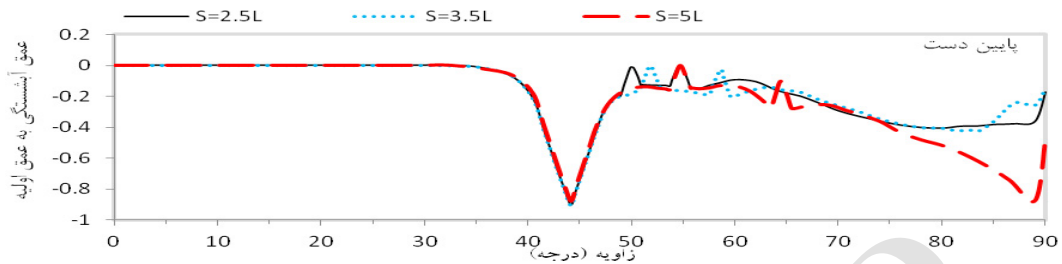
جدول ۴- مقایسه توپوگرافی بستر در حالات مستغرق برای فاصله‌های مختلف بین آبشکن‌ها

Table 4. The comparison of bed topography in submerged case for different distances between spur dikes

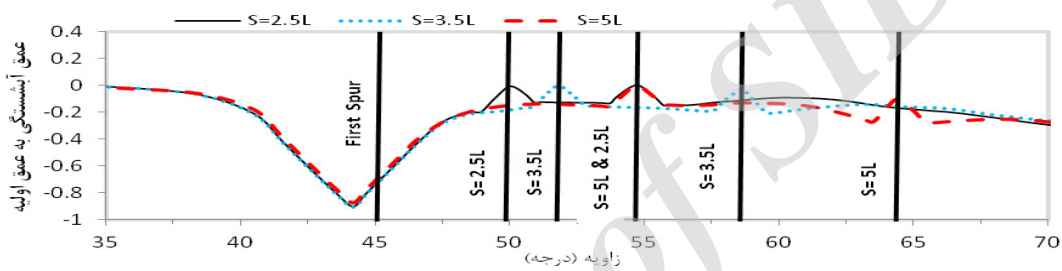
تغییرات فاصله بین آبشکن‌ها Changing of distance between dikes	از ۳/۵ به ۲/۵ برابر طول آبشکن From 2.5 to 3.5 times of dike length	از ۲/۵ به ۵ برابر طول آبشکن From 2.5 to 5 times of dike length	از ۳/۵ به ۵ برابر طول آبشکن From 3.5 to 5 times of dike length
کاهش بیشینه آبشستگی (%) کاهش بیشینه رسوب‌گذاری (%)	Increase of maximum scouring (%) 18.57	24.29	4.82
Increase of maximum sedimentation (%)	5.55	11.11	5.26



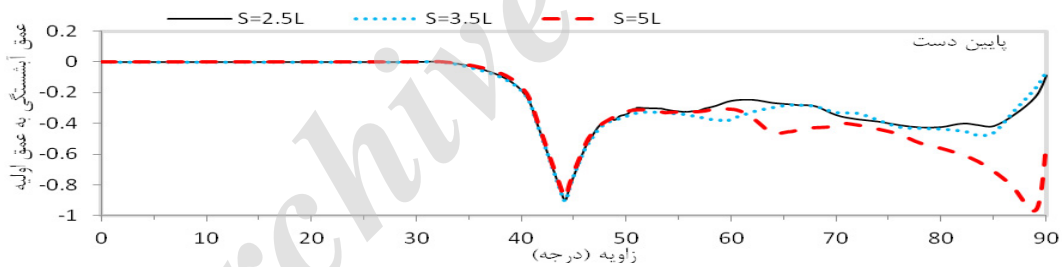
(الف) (a)



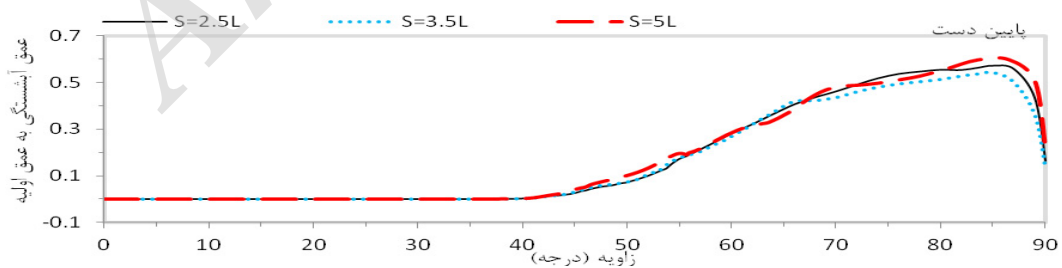
(ب) (b)



(ج) (c)



(د) (d)

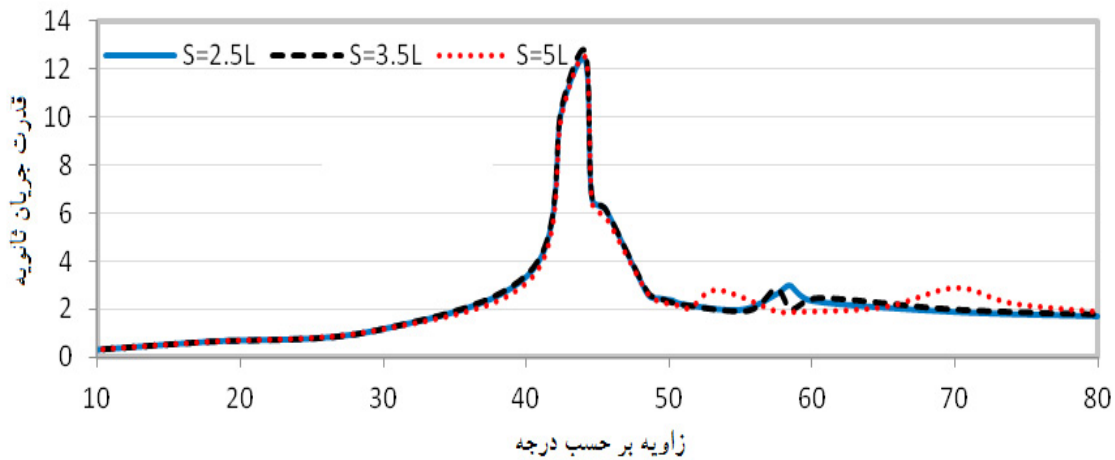


(ه) (e)

شکل ۷- پروفیل طولی بستر در حالت‌های: (الف)  $d=0.5$  cm (ب)  $d=7$  cm (ج) بزرگنمایی در  $d=7$  cm (د)  $d=11$  cm (ه)  $d=59$  cm

Figure 7- Bed longitudinal profile in cases: a)  $d=0.5$  cm, b)  $d=7$  cm, c) Enlarged of profile  $d=7$  cm, d)  $d=11$  cm, and e)  $d=59$  cm





شکل ۸- قدرت جریان ثانویه آبشکن غیر مستغرق با استفاده از روش شگری

Figure 8- The secondary flow strength for non-submerged spur dike using Shukry method

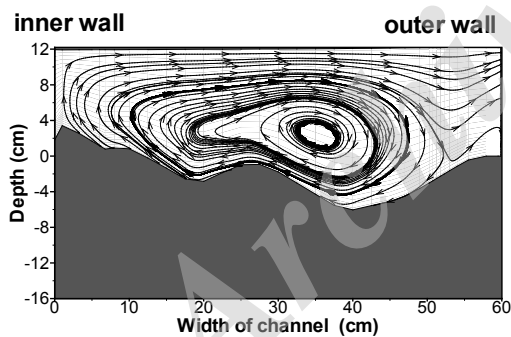
ثانویه کاهش یافته زیرا به دلیل تشکیل گردابه‌های میدان آبشکن‌ها، جریان‌های رو به پایین تضعیف شده و لذا قدرت جریان ثانویه کاهش می‌یابد. با استغراق آبشکن محل بیشینه قدرت جریان ثانویه تغییری نکرده ولی مقدار آن ۴۵٫۳۵ درصد کاهش می‌یابد که دلیل آن عبور بخشی از جریان از تراز بالای تاج آبشکن می‌باشد.

الگوی جریان

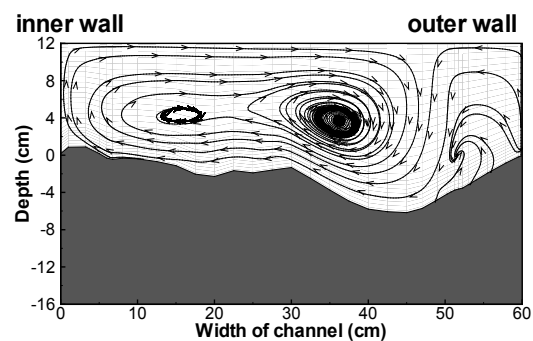
در شکل‌های ۹-الف تا ۹-ج الگوی جریان میدان آبشکن‌ها در حالت  $S=5L$  نشان داده شده است. در زاویه  $۴۷٫۵$  درجه (میدان آبشکن اول و دوم) گردابه ساحل داخلی علاوه بر گردابه مرکزی

قدرت جریان ثانویه

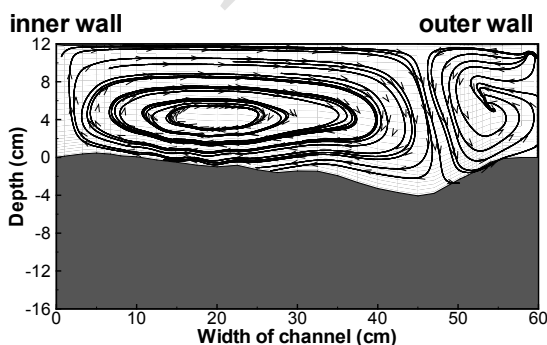
بعلت وجود جریان‌های رو به پایین قوی در بالادست آبشکن اول، بیشینه قدرت جریان ثانویه در این مکان روی می‌دهد که برای تمام فواصل بین آبشکن‌ها دارای مقداری برابر است. با توجه به اینکه جریان ثانویه به صورت جریانی دوسویه تعریف می‌شود که در سطح آب به سمت ساحل خارجی و در نزدیکی بستر به سمت ساحل داخلی جریان دارد لذا در محاسبات میزان قدرت جریان ثانویه، اثر گردابه‌های مخالف با جهت جریان عرضی لحاظ نمی‌گردد. بر اساس شکل ۸ مشاهده می‌گردد که بلافاصله پس از آبشکن اول قدرت جریان



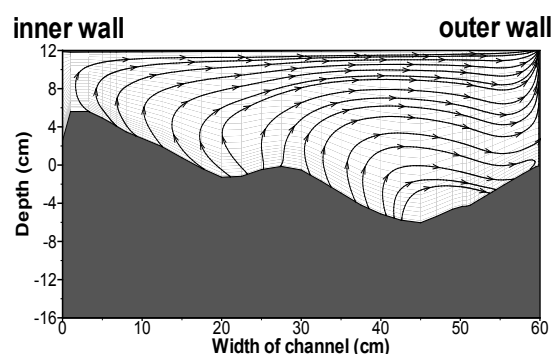
(ب) (b)



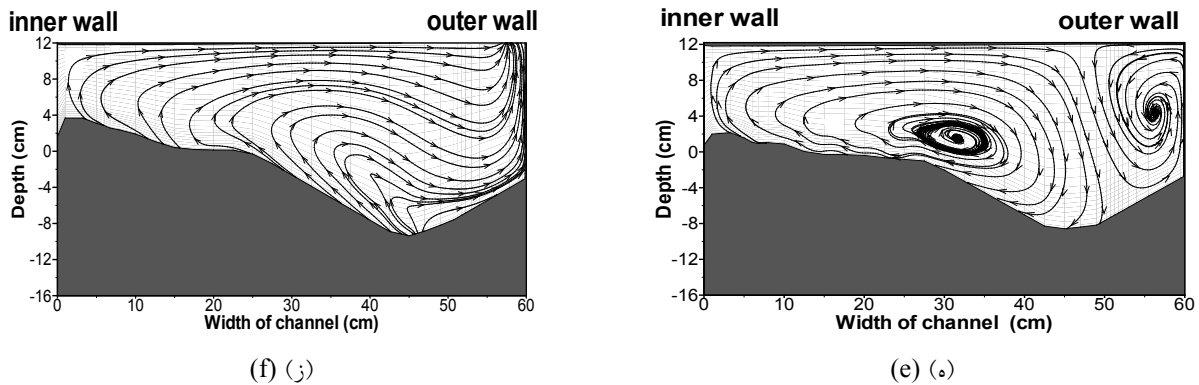
(الف) (a)



(د) (d)



(ج) (c)



شکل ۹- الگوی جریان در حالت  $S=5L$  برای: (الف)  $\theta = 47.5^\circ$  (ب)  $\theta = 60^\circ$  (ج)  $\theta = 70^\circ$  غیر مستغرق (د)  $\theta = 47.5^\circ$  مستغرق (ه)  $\theta = 60^\circ$  مستغرق (و)  $\theta = 70^\circ$  مستغرق

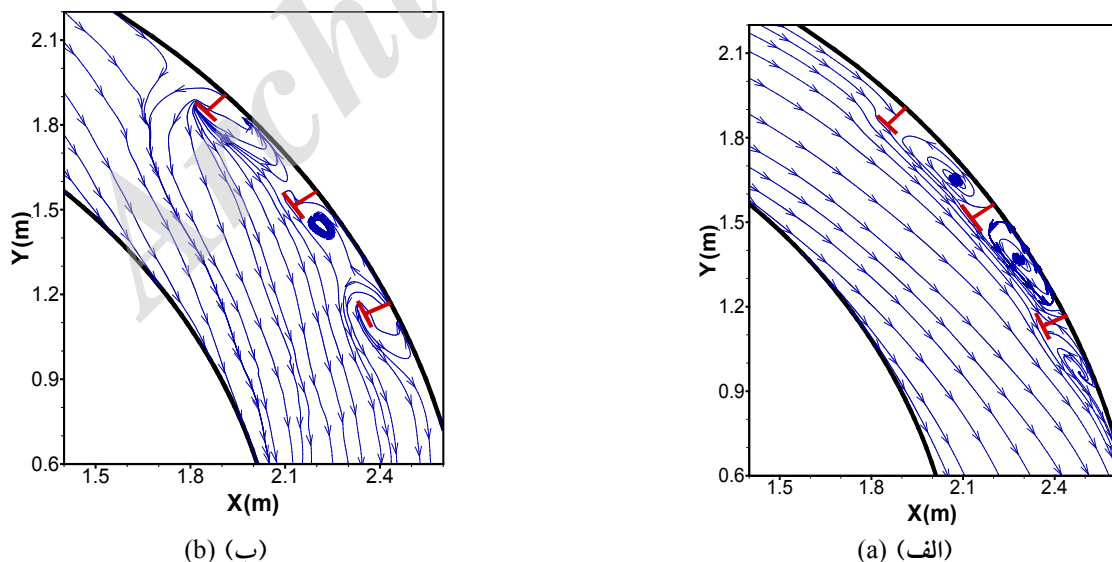
Figure 9- Flow pattern in case of  $S=5L$  for: a)  $\theta=47.5^\circ$  (non-submerged), b)  $60^\circ$  (non-submerged), c)  $70^\circ$  (non-submerged), d)  $47.5^\circ$  (submerged), e)  $60^\circ$  (submerged), and f)  $70^\circ$  (submerged)

بالای آبشکن به مسیر اصلی جریان، گردابه ساحل داخلی بسیار قوی تر می‌باشد. مقایسه شکل‌های (ب-۹ و ج-۹) هم نشان می‌دهد که جریان‌های عبوری از تراز بالای تاج آبشکن منجر به تشکیل گردابه ساحل خارجی شده‌اند و گردابه مرکزی را محدود تر نموده‌اند. در پایین دست آبشکن سوم (شکل‌های ۹-ج و ۹-ز)، استغراق آبشکن تأثیری در الگوی جریان نداشته است زیرا مقطع در فاصله پایین دست آبشکن بوده و تغییرات ایجاد شده به واسطه استغراق آبشکن با رسیدن به این مقطع مستهلک شده‌اند.

در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب الگوی جریان در سطح آب و نزدیک بستر در حالت استقرار آبشکن‌های غیر مستغرق به فاصله ۵ برابر طول آبشکن از هم نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، مشاهده می‌گردد که گردابه‌های میدان آبشکن‌ها با افزایش

وجود دارد. در ادامه مابین آبشکن دوم و سوم (زاویه ۶۰ درجه) تأثیر گردابه ساحل داخلی کم شده و گردابه مرکزی بزرگتر شده است. در زاویه ۷۰ درجه (پایین دست آبشکن سوم) گردابه مرکزی به سمت ساحل خارجی متمایل شده است زیرا در این مقطع به دلیل چاله‌های آبستگنی تشکیل شده در نزدیکی ساحل خارجی و وجود تپه‌های رسوبی در ساحل داخلی، کاهش گرادیان فشار در نزدیکی بستر وجود منطقه انرژی جنبشی بیشینه در نزدیکی ساحل خارجی، جریان عرضی بیشتر متوجه ساحل خارجی است.

بر اساس شکل‌های ۹-د تا ۹-ز، الگوی جریان در حالت مستغرق وقتی  $S=5L$  نشان داده شده است، مشاهده می‌گردد که با استغراق آبشکن بر اساس مقایسه آبشکن‌های مستغرق و غیر مستغرق (شکل‌های ۹-الف و ۹-د) به علت عبور بخشی از جریان از تراز



شکل ۱۰- الگوی جریان در حالت استقرار آبشکن غیر مستغرق در حالت  $S=5L$  در (الف) سطح آب (ب) تراز ۲٫۵ درصد عمق جریان از بستر

Figure 10- Flow pattern in case of  $S=5L$  in non-submerged mode at: a) water surface, b) the level equals to 2.5% of flow depth from the bed

۶- ابعاد و محل تشکیل گردابه‌های اصلی و ثانویه با تغییر فاصله بین آبشکن‌ها و نسبت استغراق آبشکن تغییر می‌یابند.

۷- در این تحقیق نتایج حاصل از مدل‌سازی با مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  با هم یکسان بوده و تفاوتی در تغییرات توپوگرافی بستر و الگوی جریان مشاهده نشد و دلیل آن ساده بودن هندسه مدل می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد این تحقیق در کانال‌های دارای انحناهای نسبی متفاوت نیز اجرا گردد تا تغییرات میزان آشفتگی جریان ملموس‌تر گردد.

### منابع

1. Acharya, A. Acharya, A. and Duan, JG. 2013. Three Dimensional Simulation of Flow Field around Series of Spur Dikes. International Refereed Journal of Engineering and Science 2(7): 36-57.
2. Chen, FY. and Ikeda, S. 1997. Horizontal separation in shallow open channels with spur dikes. Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering 15(2): 15-30.
3. Dehghani, AA. Azamathulla, H. Hashemi Najafi, SF. and Ayyoubzadeh, SA. 2013. Local scouring around L-head groynes. Journal of Hydrology 500(7): 299-309.
4. Ettema, R. and Muste, M. 2004. Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flat bed channel. Journal of Hydraulic Engineering 130(7): 635-646.
5. Fazli, M. Ghodsian, M. and Salehi SAA. 2008. Scour and flow field around a spur dike in a 90o bend. International Journal of Sediment Research 23(1): 56-68.
6. Kang, J. Yeo, H. Kim, S. and Ji, U. 2011. Experimental investigation on the local scour characteristics around groynes using a hydraulic model. Water and Environmental Journal 25(2): 181-191.
7. Koken, M. and Constantinescu, G. 2008. An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: 2. Conditions corresponding to the final stages of the erosion and deposition process. Water Resources Research 44(8): 1-16.
8. Kuhnle, RA. Alonso, CV. and Shields FD. 1999. Geometry of Scour Holes Associated with 90 Spur Dikes. Journal of Hydraulic Engineering 125(9): 972-978.
9. Masjedi, A. Bejestan, MS. and Rahnavard, P.

فاصله از بستر به سمت سطح آب، به دلیل افزایش سرعت جریان و همچنین تمایل جریان به ساحل خارجی، ابعادشان افزایش یافته است. در نزدیکی بستر به علت تمایل جریان به ساحل داخلی، جریان کمتری وارد میدان آبشکن‌ها شده و لذا ابعاد گردابه‌ها کوچک‌تر است. در نزدیکی ساحل خارجی در میدان آبشکن‌ها، جریان به سمت بالادست بوده و در حالی که در نزدیکی بال آبشکن به دلیل تاثیر جریان اصلی کانال، به سمت پایین دست حرکت کرده و لذا با توسعه جریان رفت و برگشتی، گردابه‌ها تشکیل شده‌اند. ابعاد ناحیه جدایی جریان در نزدیکی بستر بیشتر بوده در حالی که در سطح آب به دلیل افزایش سرعت‌های طولی، طول ناحیه اتصال مجدد جریان بیشتر است. وقتی آبشکن‌های مذکور مستغرق شوند در سطح آب مانعی در برابر جریان وجود نداشته ولی کماکان در فاصله مابین آبشکن دوم و سوم به دلیل تاثیر زیاد گردابه طولی، جریان‌های رو به بالادست در نزدیکی ساحل خارجی بر جریان اصلی غلبه کرده و یک گردابه در سطح آب در نزدیکی ساحل خارجی تشکیل می‌شود.

### بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از مدل عددی SSIIM به مطالعه الگوی جریان و آبستنگی پیرامون آبشکن‌های سری سرسپری مستقر در قوس ۹۰ درجه ملایم تحت تاثیر فاصله و استغراق آبشکن‌ها و اعتبار سنجی آن با مدل آزمایشگاهی پرداخته شده است. هفت مدل‌سازی مجزا شامل کانال با یک آبشکن و همچنین کانال با وجود آبشکن‌هایی به فاصله‌های ۲/۵، ۳/۵ و ۵ برابر طول آبشکن در حالت‌های مستغرق و غیرمستغرق انجام شده است. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به صورت خلاصه در ادامه ارائه شده است:

- ۱- در حالت غیرمستغرق در تمام حالات فاصله‌های مابین آبشکن‌ها یک چاله آبستنگی اصلی در لبه بال بالادست آبشکن اول و یک چاله آبستنگی ثانویه در انتهای قوس کانال تشکیل می‌گردد و با افزایش فاصله بین آبشکن‌ها، چاله آبستنگی به سمت پایین دست قوس گسترش می‌یابد. وقتی که آبشکن‌ها به فاصله ۵ برابر طول آبشکن از هم قرار می‌گیرند علاوه بر چاله‌های آبستنگی بالادست آبشکن اول و انتهای قوس، یک چاله آبستنگی در مجاورت بال آبشکن سوم تشکیل می‌گردد، آبستنگی بیشینه در انتهای کانال و در چاله آبستنگی خروجی قوس اتفاق می‌افتد و میزان آبستنگی و رسوب گذاری بیشینه از سایر حالات بیشتر بوده است.
- ۲- با استغراق ۲۵ درصدی آبشکن‌ها در تمام فاصله‌های بین آبشکن‌ها، آبستنگی بیشینه در نزدیکی آبشکن اول روی نمی‌دهد بلکه در محدوده آبشکن سوم تا خروجی قوس اتفاق می‌افتد.
- ۳- بیشینه آبستنگی و رسوب گذاری با استغراق آبشکن کاهش می‌یابد.
- ۴- در حالت مستغرق با افزایش فاصله بین آبشکن‌ها میزان آبستنگی و رسوب گذاری بیشینه، افزایش می‌یابد.
- ۵- با استغراق آبشکن میزان بیشینه قدرت جریان ثانویه که در بالادست آبشکن اول روی می‌دهد، ۴۵/۳۵ درصد کاهش می‌یابد.

Experimental study on the effect of Froude number on temporal variation of scour around a T shaped spur dike in a 90 degree bend. *Applied Mechanics and Materials* 147: 75-79.

21. Vaghefi, M. Ghodsian, M. and Salehi Neyshaboori, SAA. 2009. Experimental study on the effect of a T-shaped spur dike length on scour in a 90 channel bend. *Arabian Journal for Science and Engineering* 34(2): 337-348.

22. Vaghefi, M. Ghodsian, M. and Salehi Neyshaboori, SAA. 2012. Experimental study on scour around a T-shaped spur dike in a channel bend. *Journal of Hydraulic Engineering* 138(5): 471-474.

23. Vaghefi, M., Mohsenimehr, VA. and Akbari, M. 2014. Numerical investigation of wing to web length ratios parameter of T-shaped spur dike in a 90 degree bend on scour pattern. *Journal of River Engineering* 2(3): 24-32.

24. Vaghefi, M. Safarpour, Y. and Hashemi, SS. 2015. Effects of relative curvature on the scour pattern in a 90° bend with a T-shaped spur dike using a numerical method. *International Journal of River Basin Management* 13(4): 501-514.

25. Vaghefi, M. Shakerdargah, M. and Akbari, M. 2014. 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 Engineering and Environmental Sciences* 38(2): 266-277.

26. 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.

27. Vaghefi, M. Shakerdargah, M. Fiouz, AR. and Akbari, M. 2014. Numerical investigation of the effect of Froude number on flow pattern around a single T-shaped spur dike in a bend channel. *International Journal of Engineering Research* 3(5): 351-355.

28. Xiufang, Z. Pingyi, W. and Chengyu, Y. 2012. Experimental study on flow turbulence distribution around a spur dike with different structure. *Procedia Engineering* 28(5): 772-775.

2010. Reduction of local scour at single T-shape spur dike with wing shape in a 180 degree flume bend. *World Applied Sciences Journal* 8(9): 1122-1128.

10. Masjedi, A. Dehkordi, V. Alinejadi, M. and Taeedi, A. 2010. Experimental Study on Scour Depth in Around a T-shape Spur Dike in a 180 Degree Bend. *Journal of American Science* 6(10): 524-529.

11. Nagata, N. Hosada, T. and Nakato, T. 2005. Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 131(12): 1074-1087.

12. Olsen, NRB. 1999. *Computational fluid dynamics in hydraulic and sedimentation engineering* (2th Ed). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

13. Olsen, NRB. 2000. *CFD Algorithms for hydraulic Engineering*. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

14. Olsen, NRB. 2001. *CFD modeling for hydraulic structures*. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

15. Olsen, NRB. 2014. *A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movement in water intakes with multi-block option*. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

16. Vaghefi, M. Ahmadi, A. and Faraji, B. 2015. The effect of support structure on flow patterns around T-shape spur dike in 90° bend channel. *Arabian Journal of Science and Engineering* 40(5): 1299-1307.

17. Vaghefi, M. Akbari, M. and Fiouz, AR. 2016. 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): 1582-1593.

18. Vaghefi, M. and Ghodsian, M. 2010. An Experimental Study on the Effect of T Shape Spur Dike on Down Stream Topography in a 90 Degree Bend. *Journal of Civil Engineering* 22(1): 113-128. (In Persian)

19. Vaghefi, M. and Ghodsian, M. 2010. Experimental Study on Power of Secondary Flow and Vortices in a 90 Degree Bend with Single T Shape Spur Dike. *Journal of Civil Engineering* 21(2): 111-128. (In Persian)

20. Vaghefi, M. Ghodsian, M. and Adib, A. 2012.

**Abstract****Numerically Study of Flow and Scour Patterns Due to Series T-Shaped Spur Dikes**M. Vaghefii<sup>1</sup>, Y. Safarpoori<sup>2</sup> and M. Akbarii<sup>2</sup>

This paper addressed variations in scour and flow patterns around T-shaped spur dikes located at a 90 degree mild bend. Simulation of flow and scour patterns was conducted through 7 distinct modeling for a single and non-submerged spur dike and also with series spur dikes at distances of 2.5, 3.5, and 5 times the spur dike length from each other in non-submerged and submerged (25% submergence) modes using a numerical model. A comparison between the experimental and numerical results was carried out in non-submerged and single mode. Accommodation of experimental and numerical data was indicative of the efficiency of SSIIM numerical model in scour and flow pattern simulation in bend channels. The results of this study demonstrated that the dimensions and location of vortices, as well as the degree of scour, would change by varying the distance between the spur dikes, and spur dikes' submergence ratio; hence, in a submerged mode, increasing the distance between the spur dikes would increase the degree of scour and the maximum sedimentation, while increasing spur submergence would decrease the maximum scour and sedimentation, and the maximum secondary flow strength occurring at the upstream end of the first spur dike would decrease by 34.55%. In addition, a 25% submergence of spur dikes would lead the maximum scour to occur at the distance from the third spur dike to the bend exit.

**Keywords:** SSIIM Model, T-shaped Spur Dike, Series Spur Dikes, Scour, Submergence

1. Associate Professor of Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr. Corresponding author, E-mail: vaghefi@pgu.ac.ir.

2. M.Sc. Graduated Student, Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr.