



دانشگاه گورگان و منابع طبیعی گورگان

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و دوم، شماره ششم، ۱۳۹۴

<http://jwsc.gau.ac.ir>

بررسی عددی تأثیر موقعیت اتصال کانال فرعی بر الگوی جریان در قوس رودخانه

* رسول قبادیان^۱ و زهرا صیدی تبار^۲

^۱دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی کرمانشاه، ^۲دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی کرمانشاه

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۲۵

چکیده

سابقه و هدف: رودخانه‌ها به ندرت دارای مسیر مستقیم می‌باشد و همواره در یک الگوی سینوسی مسیر خود را طی می‌کنند. اتصال رودخانه فرعی به رودخانه اصلی در محل قوس، الگوی متعارف جریان در قوس رودخانه را کاملاً به هم می‌ریزد. الگوی به وجود آمده نه تنها تحت تأثیر نیروهای گریز از مرکز و گرادیان‌های طولی و عرضی فشار قرار دارد بلکه متأثر از مومنتم جریان کانال فرعی نیز می‌باشد. شناخت دقیق چنین پدیده‌ای نیاز به مطالعات وسیعی دارد.

مواد و روش‌ها: از این‌رو در این پژوهش اثر موقعیت اتصال کانال فرعی با زاویه اتصال ۹۰ درجه به قوس با استفاده از نرم‌افزار SSIM1 مطالعه شد و تأثیر سه موقعیت ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه از ابتدای قوس، بر پروفیل قائم سرعت طولی جریان، تغییرات عمق آب در کانال اصلی، توزیع تنش برشی بستر و قدرت جریان ثانویه بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد در ساحل مجاور کانال فرعی افزایش موقعیت اتصال از ۴۵ درجه به ۱۳۵ درجه مقدار سرعت طولی حداکثر ۵۶ درصد افزایش و در ساحل مقابل حداکثر ۸ درصد کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: در قوس خارجی حداکثر اختلاف رقوم سطح آب بالادست و پایین‌دست تلاقی در موقعیت اتصال ۴۵ درجه مشاهده شد که حدود ۶/۱۵ درصد عمق پایاب کانال است. برای موقعیت اتصال ۱۳۵ درجه این اختلاف به حدود ۵/۴ درصد عمق پایاب تقلیل می‌یابد. علاوه بر این نتایج نشان داد با افزایش موقعیت اتصال از ۴۵ به ۱۳۵ درجه حداکثر تنش برشی بستر در محل اتصال در حدود ۸ درصد کاهش یافته است.

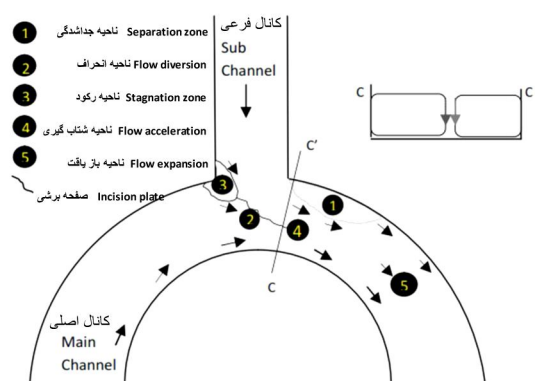
واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، موقعیت تلاقی، قوس رودخانه‌ای ۱۸۰ درجه، مدل SSIM1، کانال فرعی

* مسئول مکاتبه: rsglobalian@gmail.com

مقدمه

الگوی جریان در محل تلاقی رودخانه‌های طبیعی از مباحث پیچیده و مهم در مهندسی رودخانه است. برخورد دو جریان با یکدیگر پدیده‌ای است که هم در طبیعت (رودخانه‌ها) و هم در مصنوعات بشری (کانال‌های آبیاری و زهکش‌های فاضلاب) دیده می‌شود. بررسی خصوصیات جریان در محل تلاقی رودخانه‌ها و کانال‌های روباز یکی از موضوعات مورد بحث مدل‌های ریاضی سه‌بعدی در دهه اخیر بوده است. علی‌رغم این‌که اثر عوامل مختلف بر دینامیک جریان و رسوب کانال‌های متلاقی بسیار مورد توجه

قرار گرفته است، تنها اطلاعات اندکی از اثر انحنا قوس بر الگوی جریان در محل تقاطع رودخانه‌ها موجود می‌باشد. از جمله بررسی‌های محدودی که در مورد تلاقی رودخانه در یک بازه قوسی شکل صورت گرفته است، می‌توان به پژوهش آزمایشگاهی و عددی رابرتز (2004) در تقاطع رودخانه‌های مناندی اشاره نمود. بر اساس پژوهش مذکور نواحی شناسایی شده در تقاطع کانال‌های مستقیم و قوسی مطابق شکل ۱ می‌باشد.



شکل ۱- نواحی شکل گرفته در محل تقاطع کانال‌های مستقیم و قوسی (رابرتز، 2004).

Figure 1. Areas formed by the intersection of straight and curved channels (From: Roberts, 2004).

محل یک تلاقی را که در آن کانال فرعی جریان آب و گل با غلظت بالا را در کانال اصلی تخلیه می‌نماید، شبیه‌سازی کند. بایرون و همکاران (2004) از یک مدل سه‌بعدی برای بررسی فرآیند اختلاط جریان در پایین‌دست اتصال استفاده کردند. شبیه‌سازی آن‌ها روی تلاقی‌های هم‌کف و غیرهم‌کف در آزمایشگاه و همچنین تلاقی صحرائی در شرایط جریان کم و جریان زیاد انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که اختلاف رقوم کف بستر تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر اختلاط جانبی جریان دارد. همچنین اختلاط کامل در فاصله‌های

استفاده از مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان در محل تلاقی اخیراً بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعات هوانگ (2002) اشاره کرد. او مدلی سه‌بعدی برای یک تلاقی با زاویه ۹۰ درجه که توانایی پیش‌بینی تغییرات سطح آب را داشت، ارائه کرد. چن و پنگ (2006) یک مدل عددی دوبعدی را برای جریان دو لایه که در آن هر لایه دارای سرعت و چگالی متفاوت می‌باشد ارائه نمودند و نشان دادند که این مدل قادر است به خوبی تغییرات عمق و سرعت جریان در

زنگ (2010) جریان‌های زیر بحرانی و فوق بحرانی را در تقاطع نهرها با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی و حل معادلات ناویر-استوکس مورد مطالعه قرار دادند و توزیع سرعت و جریان را با دقت خوبی شبیه‌سازی کردند. هونگ و کیم (2011) با استفاده از روش حجم‌های محدود، و در نظر گرفتن یک سلول فرضی که باعث اصلاح شرط مرزی داخلی در تقاطع می‌شد، جریان را در تقاطع نهرهای بسته مورد بررسی قرار دادند. رایلی و رودز (2012) تحقیقاتی میدانی بر الگوی جریان و مورفولوژی رودخانه‌های دارای تقاطع قوسی شکل انجام دادند. آن‌ها مولفه‌های سه‌بعدی سرعت و مورفولوژی رودخانه در یک تقاطع قوسی شکل را برداشت نمودند و نشان دادند که جریان در کانال اصلی با ترکیب جریان فرعی شتاب می‌گیرد و حداکثر شتاب جریان هنگامی رخ می‌دهد که کانال فرعی در راس قوس خارجی باشد. بغلانی و همکاران (2013) با ارائه یک مدل دوبعدی به بررسی تأثیر پارامترهای نسبت دبی، نسبت پهنا و عدد فرود پایین‌دست بر الگوی جریان در یک تلاقی ۹۰ درجه پرداختند. یانگ (2013) با ارائه یک مدل عددی که از یک مش‌بندی پویا استفاده کرده بود به بررسی خصوصیات جریان در یک تلاقی ۹۰ درجه پرداخت. نتایج مقایسه مدل او با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که مدل از توانایی خوبی در پیش‌بینی مقادیر سطح آب و سرعت برخوردار است. حبیبی و همکاران (2014) به‌منظور بررسی کارایی مدل عددی CCHE2D به شبیه‌سازی الگوی جریان، فرسایش و رسوب‌گذاری در محل تلاقی شاخه‌های فرعی با رودخانه اصلی پرداختند و نشان دادند که مدل قادر به شبیه‌سازی خصوصیات جریان در محل تلاقی می‌باشد.

بررسی مطالعاتی که در خصوص تلاقی رودخانه‌ها صورت گرفته، نشان می‌دهد بیش‌تر مطالعات تلاقی

۲۰ تا ۳۷ برابر پهنای کانال پایین‌دست اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، آن‌ها نشان دادند در تلاقی هم‌کف افزایش زاویه اتصال از ۶۰ تا ۹۰ درجه باعث اختلاط سریع‌تر جریان می‌شود. بردبروک و همکاران (2001) با استفاده از شکل اصلاح‌شده مدل اغتشاش $K-\epsilon$ بر اساس تئوری (RNG Renormalization Group) برای شبیه‌سازی بهتر برای نواحی چرخشی جریان، اصلاح پیوستگی جرم بر اساس روش تخلخل قفل و بند شده با روش سطح صلب به‌منظور شبیه‌سازی سطح آب و آزمایش‌های متعدد روی عدم وابستگی حل به اندازه شبکه مدلی عددی توسعه دادند. عمده تمرکز برد بروک و همکاران روی بررسی تأثیر نسبت سرعت، زاویه تلاقی، درجه تقارن تلاقی و اختلاف رقوم کف بستر بر اندازه انحناء خطوط جریان بود. نتایج آن‌ها بر روی محل تلاقی دو کانال موازی هم‌کف نشان داد جریان‌های چرخشی ثانویه قابل ملاحظه نیستند و تداخل جریان دو کانال به آهستگی صورت می‌گیرد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که در یک تلاقی متقارن، عدم تقارن در سلول‌های چرخشی جریان ثانویه به دلیل تأثیرات نسبت سرعت اتفاق می‌افتد. قبادیان (2008) با استفاده از مدل عددی $SSIIM2$ به بررسی تأثیر عدد فرود پایاب بر الگوی جریان به‌ویژه جریان ثانویه در محل تلاقی کانال‌های مستطیلی روباز با زاویه اتصال ۶۰ درجه پرداخت. گوستین و همکاران (2009) مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی در شبیه‌سازی جریان در تقاطع‌ها انجام دادند و از داده‌های آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده کردند. علامتیان و جعفرزاده (۲۰۱۰) جریان سیلاب فوق بحرانی در تقاطع کانال‌ها را شبیه‌سازی نمودند و با مقایسه دو مدل $DASM$ و $Reo-TVD$ نتیجه گرفتند که مدل $Reo-TVD$ بهتر می‌تواند شرایط جریان را شبیه‌سازی کند و عملکرد مطلوب‌تری دارد. لی و

درجه آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس، در پژوهش آزمایشگاهی پیرستانی (2004) مدل‌سازی شد که در آن، قوسی با مقطع مربع به عرض و ارتفاع ۰/۶ متر مورد آزمایش قرار گرفته است. طول کانال مستقیم ورودی قبل از قوس و خروجی بعد از آن به ترتیب ۷/۲ و ۵/۲ متر می‌باشد. ضمن این‌که از کانال مستقیمی به طول ۴ متر و مقطع مشابه قوس با زاویه اتصال ۹۰ درجه در سه موقعیت ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه از ابتدای قوس به‌عنوان کانال فرعی استفاده شده است. دیواره و بستر کانال فرعی از جنس پلکسی‌گلاس با اندازه زبری ($K_s=0/0001m$) ساخته شده است. مشخصات هندسی کانال در شکل ۲ و جدول ۱ ارایه شده است.

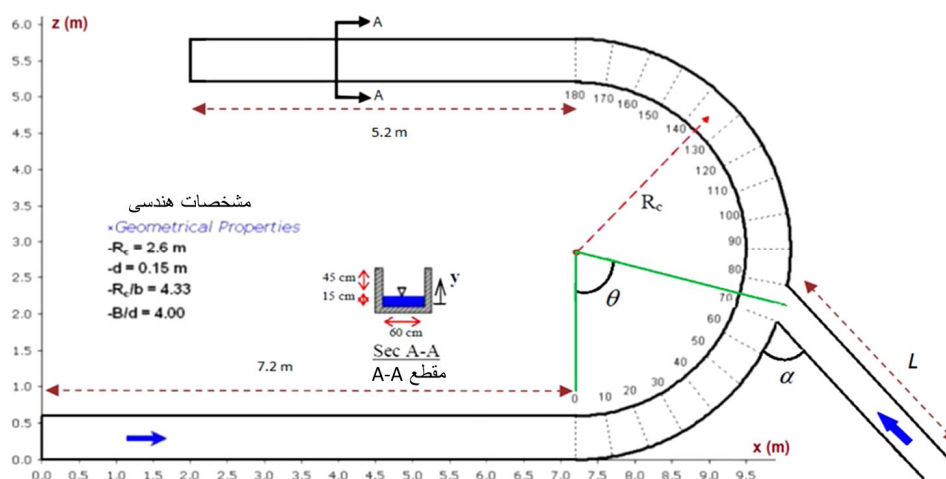
کانال‌های مستقیم و در آزمایشگاه آن هم در فلوم‌های کوچک بوده است و کم‌تر تأثیر انحنا قوس‌ها بر دینامیک جریان مورد توجه قرار گرفته است و اطلاعات اندکی از اثر انحنا قوس بر الگوی جریان در تقاطع‌ها و تلاقی رودخانه موجود می‌باشد. بر این اساس مطالعه حاضر بر آن است تا با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و به‌کارگیری مدل عددی سه‌بعدی SSIIM1، به مطالعه تأثیر موقعیت اتصال کانال فرعی به قوس پرداخته و سعی در شناخت هرچه بیشتر الگوی جریان در محل تلاقی رودخانه شده است.

مشخصات هندسی و هیدرولیکی میدان حل: قوس
به‌کار رفته در حل عددی بر مبنای ابعاد کانال ۱۸۰

جدول ۱- مشخصات هندسی میدان مورد مطالعه.

Table 1. Geometric characteristics of the studied field.

نوع مقطع	شیب طولی کانال اصلی	عرض کانال اصلی و فرعی	شعاع مرکزی قوس	طول کانال فرعی
Shape of channel cross-section	Longitudinal slope of the main channel bed	Wide of main and latera channel B (m)	Central bend radius Rc (m)	Length of sub channel (m)
مربع Square	0.0015	0.6	2.6	4



شکل ۲- شمای هندسی میدان مورد مطالعه.

Figure 2. Plan view of the study area.

شرایط مرزی جریان: شرایط مرزی در پچلت به عنوان شرایط مرزی برای جریان‌های ورودی در نظر گرفته شده است. این شرایط برای سرعت‌ها به کار برده می‌شود و اغلب مشکل است که از آن برای اغتشاش استفاده شود. معمولاً از یک مدل اغتشاش ساده $(v_t = 0.11u^*h)$ یا $(v_t = 0.067u^*h)$ برای تعیین لزجت گردابی در مقطع ورودی استفاده می‌شود. با معلوم بودن سرعت می‌توان تنش برشی (τ) را در بستر ورودی حدس زد. پس از آن انرژی جنبشی اغتشاش k در بستر ورودی تعیین می‌شود:

$$k = \frac{\tau}{\rho \sqrt{c'_\mu}} \quad (5)$$

با استفاده از معادله $(v_t = C'_\mu \frac{K^2}{\varepsilon})$ و لزجت داده شده و k در بستر مقدار ε در بستر ورودی نیز تعیین می‌گردد. اگر فرض شود که k از بستر تا سطح آب به صورت خطی تغییر می‌کند از رابطه ۵ و پروفیل لزجت گردابی توزیع قائم ε محاسبه می‌گردد. در مرز خروجی شرایط گرادیان صفر برای تمام پارامترها به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده است. سطح آب با استفاده از روش سرپوش ثابت (Fixed Lid) به همراه گرادیان صفر برای همه متغیرها تعیین شده است. موقعیت سرپوش ثابت و جابجایی آن به عنوان تابعی از زمان و میدان جریان، به وسیله فشار و الگوریتم برنولی محاسبه می‌شود. الگوریتم بر اساس میدان فشار است که از معادله برنولی در امتداد سطح آب استفاده می‌کند تا این که موقعیت سطح آب را بر اساس نقطه مرجع ثابتی که حرکت نمی‌کند (در این پژوهش انتهای پایین دست کانال اصلی) محاسبه می‌شود. از قانون دیوار برای مرزهای زیر به عنوان شرط مرزی در بستر و دیوارها استفاده شد:

معادلات حاکم بر میدان جریان: در این پژوهش از مدل عددی SSIIM1 برای شبیه‌سازی جریان در تلاقی دو کانال نشان داده شده در شکل ۲ استفاده شد. در مدل مذکور معادلات ناویر-استوکس برای جریان آشفته در یک فضای سه بعدی به منظور محاسبه سرعت جریان با روش احجام محدود منفصل و حل می‌شوند:

$$\frac{\partial U_j}{\partial X_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad (2)$$

$$j = 1, 2, 3$$

که در آن، U سرعت متوسط، ρ جرم واحد حجم آب، P فشار، δ_{ij} دلتای کرونکر است که اگر $i = j$ باشد برابر است با یک و در غیر این صورت معادل صفر است و x بعد عمومی مسافت است. آخرین جمله در رابطه ۲ تنش رینولدز است که اغلب با تقریب بوزینسک مدل می‌شود:

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

که در آن، v_t لزجت گردابی و k انرژی جنبشی اغتشاش است. لزجت گردابی بستگی به انرژی جنبشی اغتشاش k و اتلاف اغتشاش ε دارد:

$$v_t = C'_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

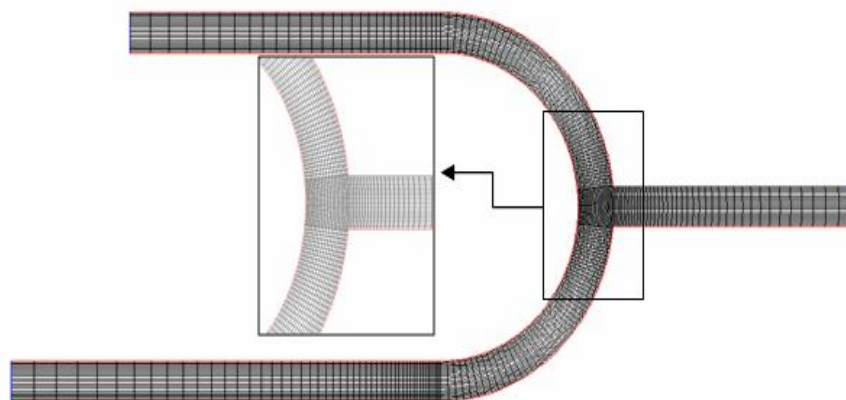
که در آن، ضریب C'_μ برابر ۰/۰۹ است. در مدل SSIIM1 مقادیر k و ε با استفاده از مدل‌های دو معادله‌ای $k - \varepsilon$ استاندارد به دست می‌آیند.

قوس و کانال فرعی از شبکه ریزتری استفاده شده است. همچنین در دو کانال مستقیم بالادست و پایین‌دست قوس و کانال فرعی با هدف کم کردن زمان محاسبات، شبکه به نحوی تنظیم می‌شود که در جهت جریان، با نزدیک شدن به قوس، شبکه ریزتر می‌شود. در شکل ۳ شمایی از شبکه تولید شده توسط این برنامه را نشان می‌دهد. همچنین در این پژوهش شبکه بندی (۱۳×۶۱×۲۰۱) به ترتیب در امتداد x، y و z به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است. معیار انتخاب شبکه بهینه عدم تغییر در خصوصیات جریان به خصوص سطح آب، مقادیر حداکثر و حداقل سرعت، فشار و انرژی جنبشی اختلاط با ریزتر نمودن اندازه شبکه می‌باشد. بر اساس دستورالعمل ارائه شده توسط بایرون و همکاران (۲۰۰۴) بزرگ‌ترین اندازه شبکه‌ای که برای آن همه پارامترهای ذکر شده در محدوده ۱۰ درصد پارامترهای به دست آمده از حل شبکه ریز قرار داشته باشند، به عنوان شبکه بهینه انتخاب شد.

$$\frac{U}{u^*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{30y}{k_s}\right) \quad (6)$$

که در آن، U سرعت، u^* سرعت برشی، k ضریب ثابت معادل 0.4 ، y فاصله از دیوار تا مرکز سلول و k_s زبری است.

شبکه بندی میدان حل: مدل عددی SSIIM1 بر خلاف مدل SSIIM2 که از شبکه غیرساختار استفاده می‌کند برای شبکه بندی محدوده مورد مطالعه نیار به یک شبکه ساختار دراد و به تنهایی قادر به تولید شبکه مورد نظر برای میدان حل نمی‌باشد بدین منظور یک برنامه تولید شبکه، برای محدوده مورد مطالعه به زبان MATLAB نوشته شد. برنامه مزبور به نحوی نوشته شده است که بتواند مطابق خواست کاربر با گرفتن تعداد گره‌ها در جهت طول، عرض کانال، موقعیت قرارگیری کانال فرعی، زاویه اتصال کانال جانبی و طول آن، محدوده میدان و شبکه بندی آن را تولید کند. همچنین این برنامه با به کار گرفتن الگوریتم خاصی، شبکه میدان را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که در نواحی نزدیک به دیواره کانال اصلی و نواحی مجاور تقاطع

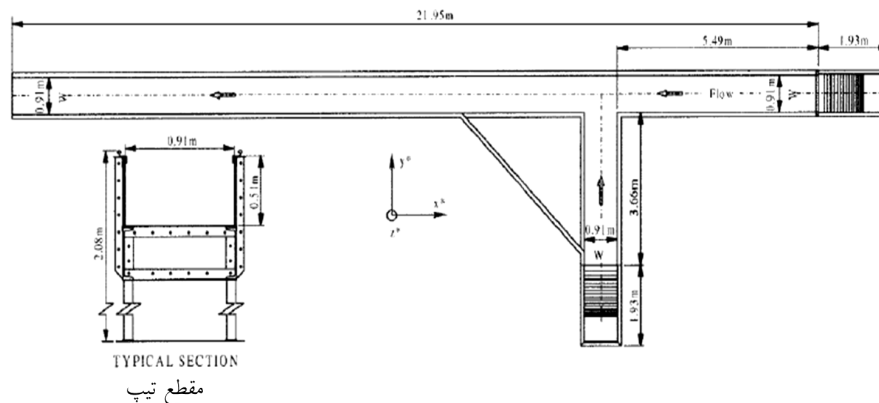


شکل ۳- شمایی از شبکه بندی منطبق بر مرزها.

Figure 3. Schematic view of the generated mesh.

۰/۹۱۴ متر است و کف کانال در تمامی نقاط کاملاً افقی است. سیستم مختصات نیز به این صورت است که جهت مثبت x به طرف بالادست کانال اصلی، جهت مثبت y در جهت کانال فرعی و جهت مثبت z به سمت بالا می‌باشد. همچنین مبداء مختصات در محل گوشه پایین‌دست اتصال قرار دارد. دبی کل در پایین‌دست کانال اصلی برابر ۰/۱۷ مترمکعب بر ثانیه است و عمق و سرعت در پایاب به ترتیب برابر ۰/۲۹۶ متر و ۰/۶۲۸ متر بر ثانیه است.

بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان در تقاطع کانال‌های مستقیم: به منظور بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان در تقاطع کانال‌های مستقیم از نتایج اندازه‌گیری وبر و همکاران (2001) در دانشگاه Iowa که بر روی تلاقی ۹۰ درجه انجام شد، استفاده گردید. در مدل آزمایشگاهی ویر طول کانال اصلی و فرعی به ترتیب ۲۱/۹۵ و ۳/۵۷ متر می‌باشد (شکل ۴). کانال فرعی در ۵/۴۹ متری پایین‌دست کانال اصلی قرار دارد. عرض (w) هر دو کانال اصلی و فرعی



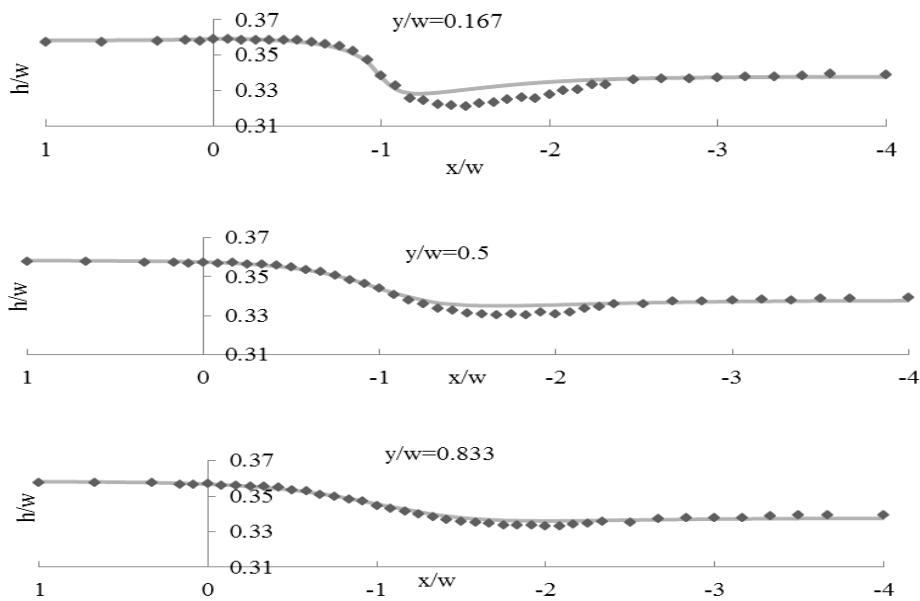
شکل ۴- فلوم آزمایشگاهی وبر (2001).

Figure 4. Weber's laboratory flume (From: Weber, 2001).

پروفیل طولی سطح آب محاسبه شده در امتداد ساحل چپ، خط مرکزی و ساحل راست کانال اصلی با مقادیر آزمایشگاهی در شکل ۵ مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است مدل عددی پروفیل طولی سطح آب را با دقت خوبی شبیه‌سازی نموده است. اختلاف در محدوده x/w ۱/۳ تا ۲/۴- و نزدیک ساحل داخلی ($y/w=0/167$) بیش‌تر است. در این محدوده عموماً مدل رقوم سطح آب را بیش‌تر محاسبه نموده است. این اختلاف به خاطر وجود ناحیه جداشدگی و ضعف مدل اغتشاش $k-\epsilon$ در نواحی جریان چرخشی و احتمالاً خطای اندازه‌گیری رقوم سطح آب به خاطر تلاطم شدید جریان می‌باشد.

در مرحله واسنجی مدل از نتایج یک سری آزمایش‌های وبر (2004) که در آن دبی کانال اصلی در بالادست تلاقی و دبی کانال فرعی به ترتیب برابر ۰/۱۲۷ و ۰/۰۴۳ مترمکعب بر ثانیه است استفاده شد. در این حالت نسبت دبی (دبی کانال فرعی به دبی کل) $q^*=0/25$ می‌باشد.

در مرحله واسنجی اندازه شبکه بهینه با سعی و خطا محاسبه شد. شبکه‌بندی مدل به صورت $(12 \times 44 \times 225)$ به ترتیب در امتداد x ، y و z می‌باشد که بصیری (2013) آن را به عنوان شبکه‌بندی بهینه معرفی کرده است. علاوه بر این ارتفاع سلول‌ها در جهت قائم متغیر در نظر گرفته شد. سلول‌های با ارتفاع کوچک‌تر نزدیک بستر انتخاب شدند.

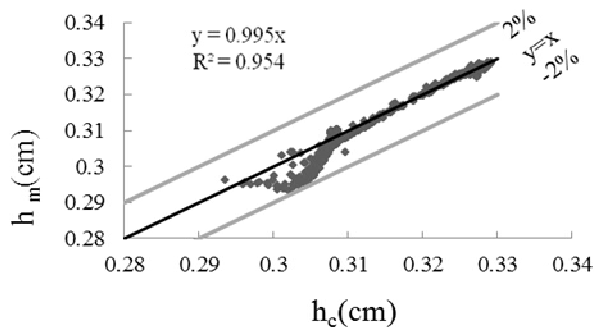


شکل ۵- مقایسه پروفیل طولی سطح آب شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در مرحله واسنجی مدل ($q^*=0.25$) (نقاط توپر اندازه‌گیری، خط ممتد محاسباتی با مدل).

Figure 5. Comparison of the simulated and laboratory water surface profile during model calibration, $q^*=0.25$ (the dots are the laboratory data and the line is the model's results).

به منظور مقایسه کمی نتایج و بررسی دقت مدل در این مرحله مقادیر سطح آب اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر سطح آب محاسبه شده در نقاط مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون به ترتیب برابر 0.954 و 0.995 به دست آمده است که نشان می‌دهد که مدل با دقت مناسبی کالیبره شده است و مدل مذکور توانایی شبیه‌سازی سطح آب را دارد. جذر میانگین مربعات خطا و خطای نسبی نیز به ترتیب 0.004899 و 0.567 برآورد شده است که نیز همین مطالب را به اثبات می‌رساند. لازم به ذکر است نقاطی که زیر خط $y=x$ که در آنها سطح آب اندازه‌گیری شده کم‌تر از مقدار محاسبه شده می‌باشد مربوط به نقاط درون ناحیه جداشدگی جریان می‌باشد. همان‌گونه که در بالا اشاره شد در این ناحیه به دلیل وجود جریان چرخشی شدید و ضعف مدل‌های اغتشاش از جمله $k-\epsilon$ بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده خصوصیات جریان اختلاف وجود دارد.

به منظور مقایسه کمی نتایج و بررسی دقت مدل در این مرحله مقادیر سطح آب اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر سطح آب محاسبه شده در نقاط مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود ضریب همبستگی و شیب خط رگرسیون به ترتیب برابر 0.954 و 0.995 به دست آمده است که نشان می‌دهد که مدل با دقت مناسبی کالیبره شده است و مدل مذکور توانایی شبیه‌سازی سطح آب را دارد. جذر میانگین مربعات خطا و خطای نسبی نیز به ترتیب 0.004899 و 0.567 برآورد شده است که نیز همین مطالب را به اثبات می‌رساند. لازم به ذکر است نقاطی که زیر خط $y=x$ که در آنها سطح آب اندازه‌گیری شده کم‌تر از مقدار محاسبه شده می‌باشد مربوط به نقاط درون ناحیه جداشدگی جریان می‌باشد. همان‌گونه که در بالا اشاره شد در این ناحیه به دلیل وجود جریان چرخشی شدید و ضعف مدل‌های اغتشاش از جمله $k-\epsilon$ بین مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده خصوصیات جریان اختلاف وجود دارد.

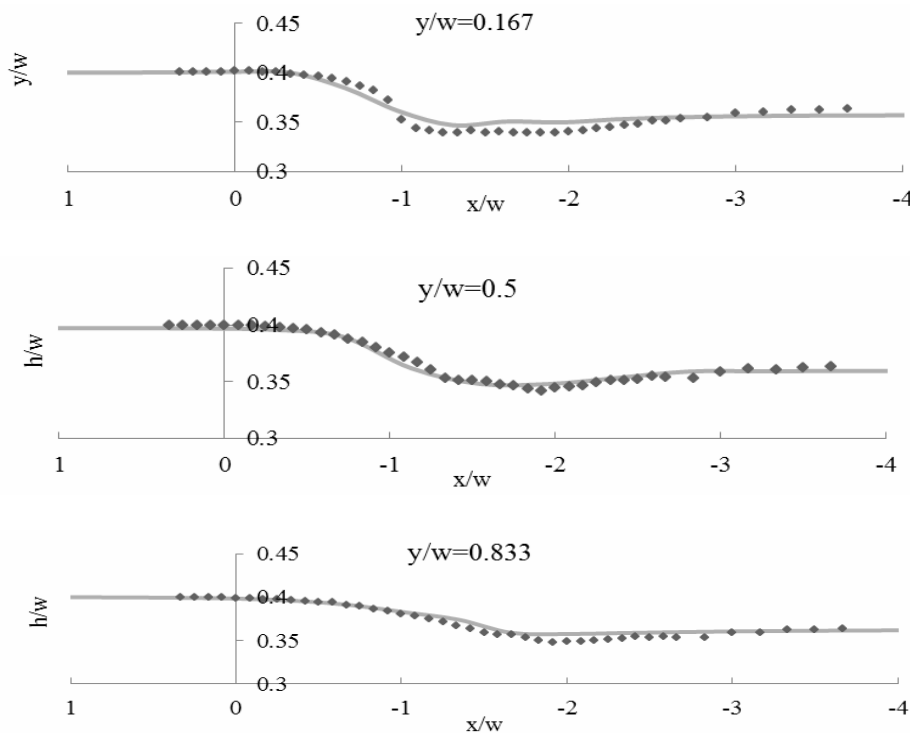


شکل ۶- مقایسه رقوم سطح آب پیش‌بینی شده (h_c) با اندازه‌گیری شده (h_m).

Figure 6. Comparison of calculated and measured water surface elevation.

توسط مدل با پروفیل‌های اندازه‌گیری شده در سواحل راست، چپ و خط مرکزی کانال اصلی ارایه شده است. بدون تجزیه و تحلیل آماری پرواضح است که مدل در مرحله صحت‌سنجی نیز از دقت مناسبی در پیش‌بینی پروفیل سطح آب در محل تلاقی کانال‌های روباز مستطیلی دارد.

با استفاده از اندازه شبکه بهینه به‌دست آمده در مرحله واسنجی برای یک سری دیگر از آزمایش‌های ویر صحت‌سنجی مدل انجام شد. در مرحله صحت‌سنجی مدل دبی کانال اصلی در بالادست تلاقی و دبی کانال فرعی به‌ترتیب برابر 0.1 و 0.07 مترمکعب بر ثانیه و نسبت دبی $q^*=0.41$ می‌باشد. در شکل ۷ پروفیل‌های طولی سطح آب محاسبه شده



شکل ۷- مقایسه پروفیل طولی سطح آب شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در مرحله صحت‌سنجی مدل ($q^*=0.41$) (نقاط توپر اندازه‌گیری، خط ممتد محاسباتی با مدل).

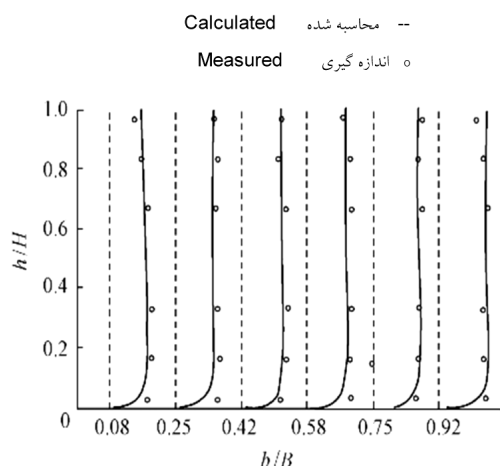
Figure 7. Comparison of the simulated and laboratory water surface profile during model validation, $q^*=0.41$ (the dots are the laboratory data and the line is the model's results).

عبوری از این کانال ۳۰ لیتر در ثانیه می‌باشد که بررسی و شبیه‌سازی الگوی جریان تحت این دبی انجام گرفته است. شبیه‌سازی جریان در قوس مورد نظر با شبکه‌بندی $7 \times 19 \times 91$ به‌ترتیب در جهات طولی، عرضی و ارتفاعی انجام شد. منصور (2006) نیز آن را به‌عنوان شبکه بهینه در قوس 180° درجه مذکور معرفی کرده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی

بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان در قوس 180° درجه: به‌منظور بررسی توانایی مدل در شبیه‌سازی جریان در قوس از داده‌های آزمایشگاهی پیرستانی (2004) استفاده شده است. طول کانال مستقیم ورودی قبل از قوس و خروجی بعد از آن به‌ترتیب $7/2$ و $5/2$ متر می‌باشد. دیواره و بستر کانال فرعی از جنس پلکسی‌گلاس ساخته شده است. دبی

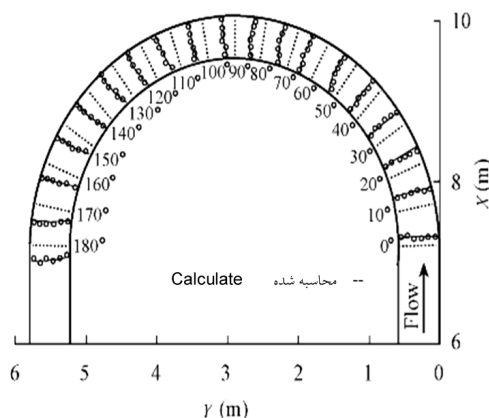
عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی کاملاً هم‌خوانی دارند و مدل عددی به خوبی میدان جریان در قوس یکنواخت را شبیه‌سازی می‌نماید و مدل به درستی کالیبره شده است.

در قوس مذکور با عرض یکنواخت ۰/۶ متر با نتایج آزمایشگاهی پیرستانی مقایسه شد که در شکل‌های ۸ تا ۱۰ ارائه شده است. این نتایج بیانگر آن است که پروفیل‌های سرعت محاسبه شده توسط مدل‌سازی



شکل ۸- مقایسه پروفیل قائم سرعت طولی با داده‌های آزمایشگاهی پیرستانی (۲۰۰۴) در مقطع ۱۸۰ درجه (B: عرض کانال، b: فاصله عرضی از جدار داخلی، H: عمق آب، h: ارتفاع از کف).

Figure 8. Comparison between the streamwise velocity profiles and the experimental data in a 180° section (B: channel width, b: latitudinal distance from the inner wall, H: centre depth, h: distance from bed).

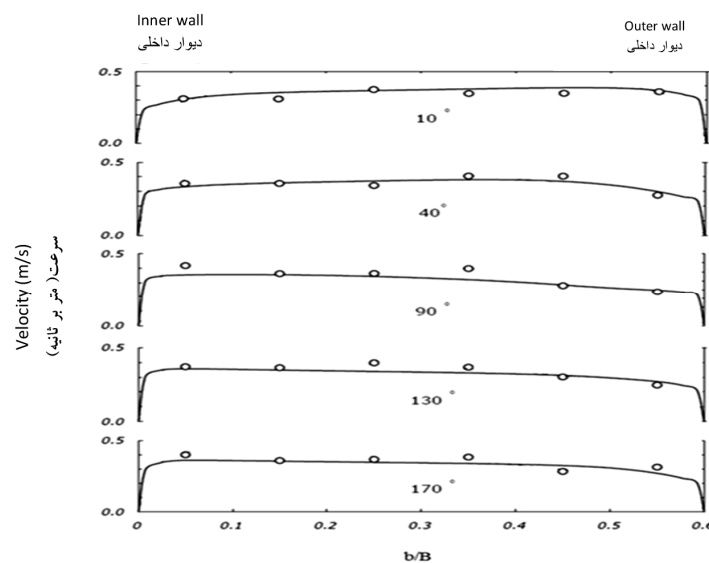


شکل ۹- مقایسه پروفیل‌های طولی سرعت در صفحه نزدیک سطح آب (h=۰/۱۴۵ m) با داده‌های آزمایشگاهی پیرستانی (۲۰۰۴).

Figure 9. Comparison of vertical profiles of the streamwise velocity near the water surface (h=0.145 m) with experimental data.

است. اعداد به دست آمده برای جذر میانگین مربعات خطا و خطای نسبی برای مقاطع مختلف بیانگر آن است که مدل عددی به خوبی میدان جریان در قوس ۱۸۰ درجه را شبیه‌سازی می‌نماید.

همچنین جدول ۲ نشان‌دهنده مقایسه آماری داده‌های آزمایشگاهی سرعت طولی در مقاطع عرضی مختلف با مقادیر محاسبه شده توسط نرم‌افزار SSIIM 1 در مرحله شبیه‌سازی جریان در قوس



شکل ۱۰- مقایسه پروفیل‌های عرضی سرعت طولی در صفحه نزدیک سطح آب ($h=0.145$ m) در مقاطع مختلف با نتایج آزمایشگاهی پیرستانی (2004) برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه. ---: شبیه‌سازی عددی با SSIIM 1، o: نتایج آزمایشگاهی (2004).

Figure 10. Comparison of lateral profiles of the streamwise velocity near the water surface ($h=0.145$ m) with experimental data. --- : simulated by SSIIM 1, o: experimental data

جدول ۲- مقایسه آماری سرعت طولی در صفحه نزدیک سطح آب در مقاطع عرضی مختلف قوس با مقادیر محاسبه شده توسط نرم‌افزار SSIIM 1.

Table 2. Statistical comparison between the streamwise velocity profiles near the water surface with experimental data at different cross section.

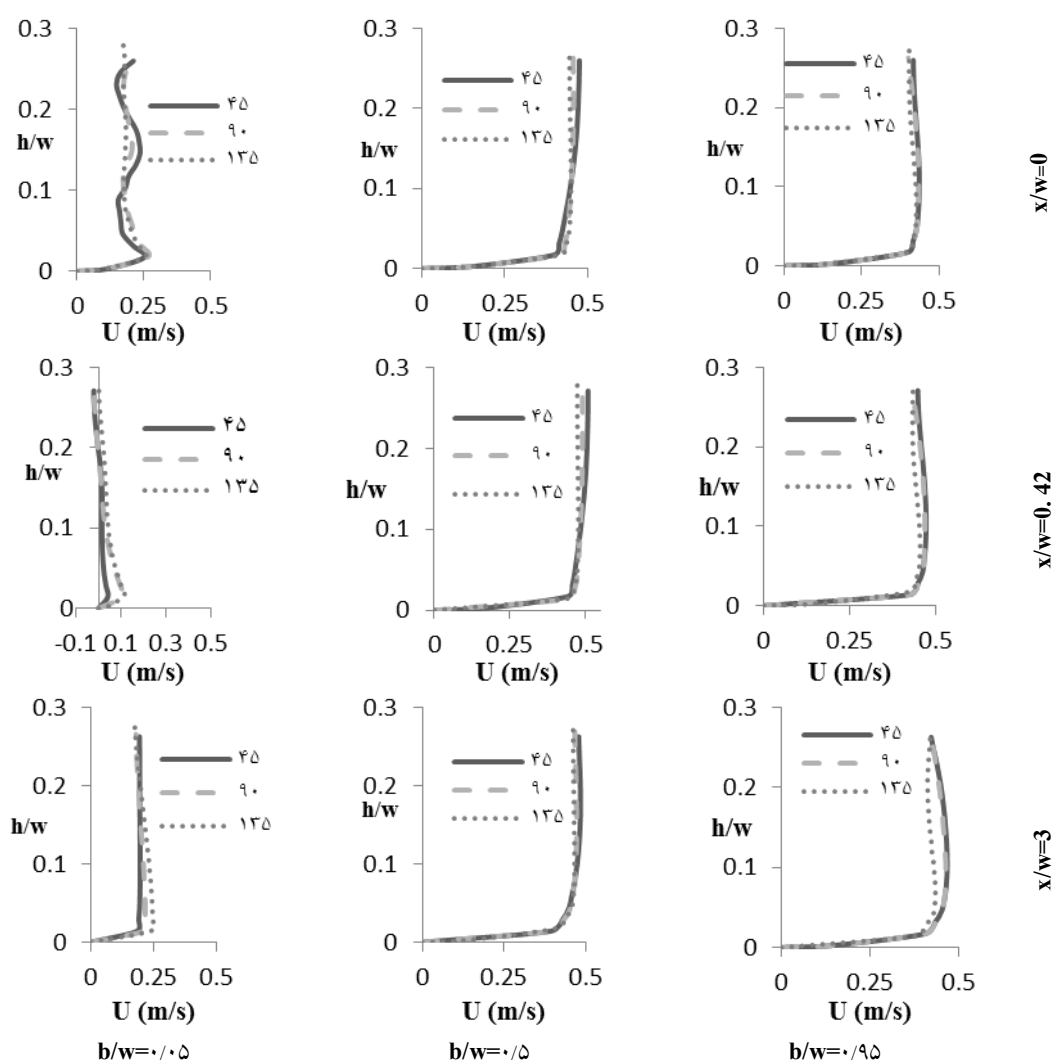
مقطع قوس	۱۰ درجه	۴۰ درجه	۹۰ درجه	۱۳۰ درجه	۱۷۰ درجه
Cross section	10 Degree	40 Degree	90 Degree	130 Degree	170 Degree
RMSE	0.07441	0.04257	0.04882	0.04340	0.04183
ME	-0.0662	-0.0095	0.0183	0.015	0.0117

خارجی ($b/w=0.05$)، خط مرکزی ($b/w=0.5$) و مجاورت قوس داخلی ($b/w=0.95$) ارائه شده است. مشاهده می‌شود در مجاورت قوس خارجی با فاصله گرفتن موقعیت اتصال کانال فرعی از ابتدای قوس سرعت طولی جریان به‌خصوص در نزدیک بستر افزایش می‌یابد این پدیده خصوصاً در ناحیه جداشدگی جریان ($x/w=0.42$) مشهودتر می‌باشد. منصور (2006) در مطالعات خود بر روی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه ملایم بررسی شده در این پژوهش، نشان داد در مقطع ۱۰۰ تا ۱۱۰ درجه خط حداکثر سرعت کاملاً در مجاورت جدار خارجی قرار

تأثیر موقعیت تلاقی بر پروفیل‌های قائم سرعت طولی در کانال اصلی: پس از اطمینان از این که مدل می‌تواند جریان در تلاقی کانال‌های مستقیم و هم‌چنین قوس بدون تلاقی را به‌درستی شبیه‌سازی نماید به بررسی تأثیر اتصال کانال فرعی به قوس در سه موقعیت ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه از ابتدای قوس و با زاویه اتصال ۹۰ درجه پرداخته شد. در شکل ۱۱ نتایج مربوط به مقایسه پروفیل‌های قائم سرعت طولی در سه موقعیت اتصال ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه از ابتدای قوس در سه مقطع ($x/w=0$)، ($x/w=0.42$) و ($x/w=3$) بعد از محل تلاقی و در مجاورت قوس

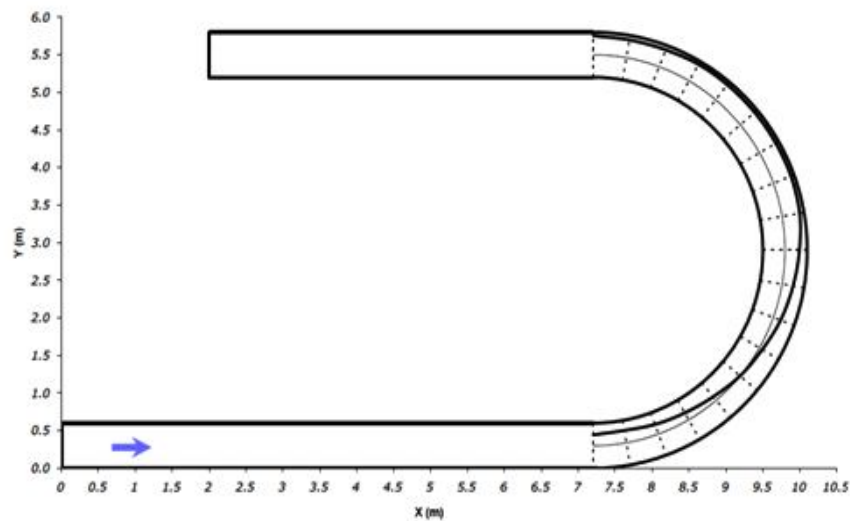
۱۳۵ درجه است که جریان ورودی هسته پر سرعت جریان اصلی را کم‌تر می‌تواند به سمت قوس داخلی جابجا کند. در نزدیک دیواره خارجی قوس با افزایش موقعیت اتصال کانال فرعی از ۴۵ به ۱۳۵ درجه مقدار سرعت طولی حداکثر ۵۶ درصد در نزدیک بستر افزایش می‌یابد در حالی که در ساحل چپ افزایش موقعیت اتصال باعث کاهش حداکثر ۸ درصدی سرعت طولی جریان در مقطع ($x/w=3$) می‌شود.

گرفته و تا انتهای کانال تقریباً بدون تغییر می‌ماند (شکل ۱۲). با ورود جریان از کانال فرعی، خط حداکثر سرعت و هسته پر سرعت جریان به سمت قوس داخلی متمایل می‌گردد. در موقعیت تلاقی ۴۵ درجه، جریان ورودی از کانال فرعی هسته پر سرعت جریان اصلی را راحت‌تر به سمت قوس داخلی جابجا می‌کند و عرض مؤثر جریان بیش‌تر کاهش می‌یابد بنابراین در حوالی مرکز قوس و دیوار داخلی سرعت جریان در این موقعیت بیش‌تر از موقعیت‌های ۹۰ و



شکل ۱۱- پروفیل‌های قائم سرعت در کانال اصلی درزاویه اتصال کانال فرعی ۹۰ درجه (x: فاصله از گوشه انتهایی کانال فرعی، b: فاصله از قوس خارجی، w: عرض کانال اصلی).

Figure 11. Vertical profiles of streamwise velocity in the main channel in 90 degree channel junction (x: distance from downstream junction corner in flow direction, b: distance from outer wall of the bend, w: main-channel width).

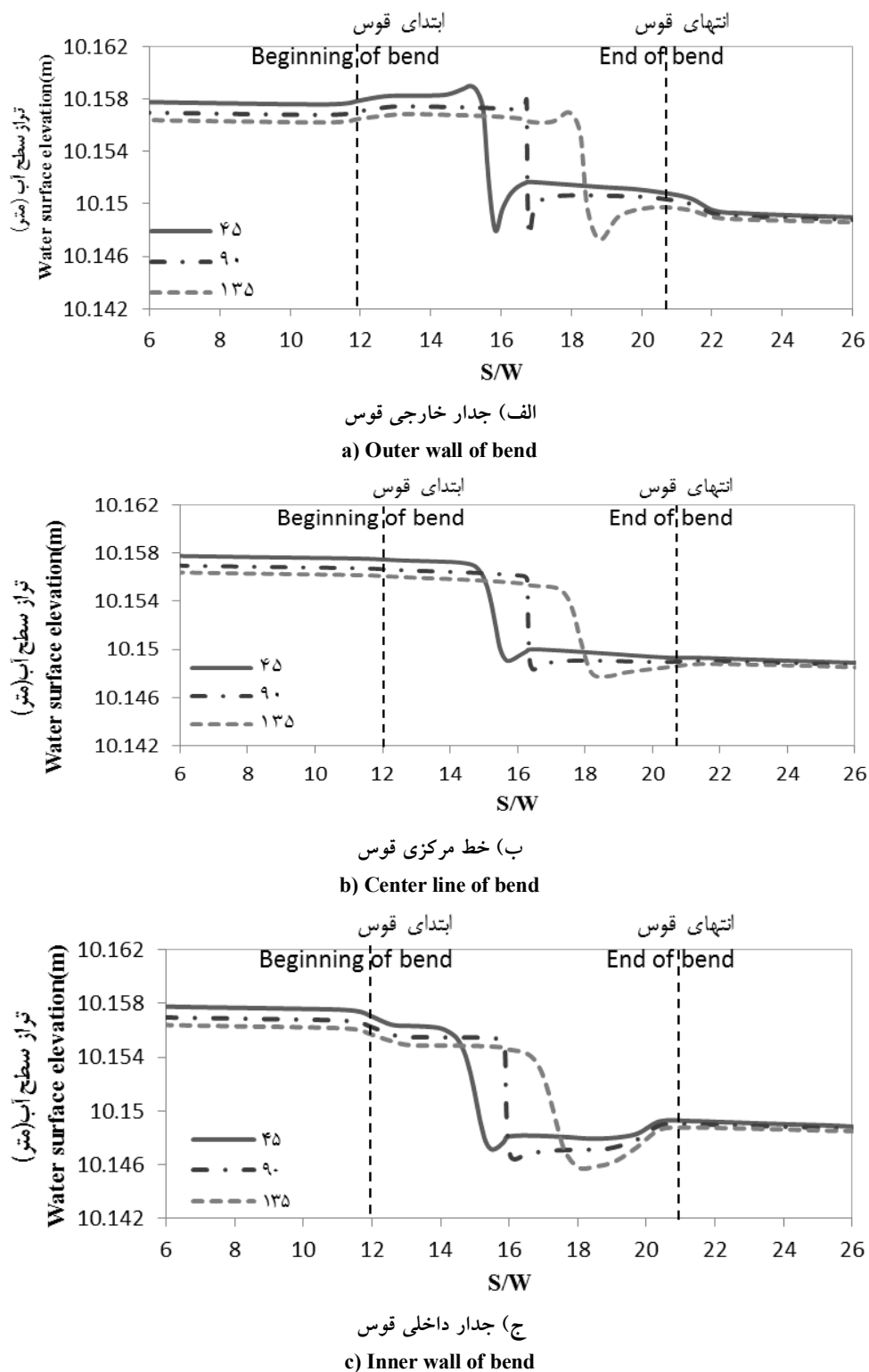


شکل ۱۲- مسیر خط حداکثر سرعت جریان در کانال U شکل بدون اتصال کانال جانبی (منصوری، ۲۰۰۶).

Figure 12. Pathway of maximum velocity in U shape channel without lateral confluence (Mansoori, 2006)

بیش تر جریان می شود. حداکثر اختلاف رقوم سطح آب بالادست و پایین دست تلاقی در قوس خارجی و موقعیت اتصال ۴۵ درجه رخ می دهد و برابر ۱/۱ سانتی متر است. این مقدار حدود ۶/۱۵ درصد عمق پایاب کانال است. برای موقعیت اتصال ۱۳۵ درجه این اختلاف به حدود ۵/۴ درصد عمق پایاب تقلیل می یابد. همچنین در انتهای قوس در مجاورت دیواره خارجی افت نسبی سطح آب و در مجاورت دیوار داخلی افزایش نسبی رقوم سطح آب برای همه موقعیت های اتصال قابل مشاهده است. این پدیده در قوس های ملایم بدون اتصال کانال فرعی نیز رخ می دهد.

تأثیر موقعیت تلاقی بر پروفیل های طولی عمق جریان: شکل ۱۳ تأثیر موقعیت اتصال ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه بر پروفیل سطح آب ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش فاصله موقعیت اتصال از ابتدای قوس اختلاف تراز سطح آب بالادست و پایین دست کم تر می شود. تغییرات تراز سطح آب در هر سه موقعیت اتصال در ساحل سمت راست (مجاور اتصال) بیش تر است. با افزایش موقعیت اتصال کانال فرعی مقدار نفوذ جریان کانال فرعی در کانال اصلی کم تر شده و عرض مؤثر عبور جریان در کانال اصلی در موقعیت قرارگیری کانال فرعی ۴۵ درجه از ابتدای قوس نسبت به دو موقعیت ۹۰ و ۱۳۵ کم تر می باشد و همین امر باعث برگشت آب در بالادست و پس زدگی

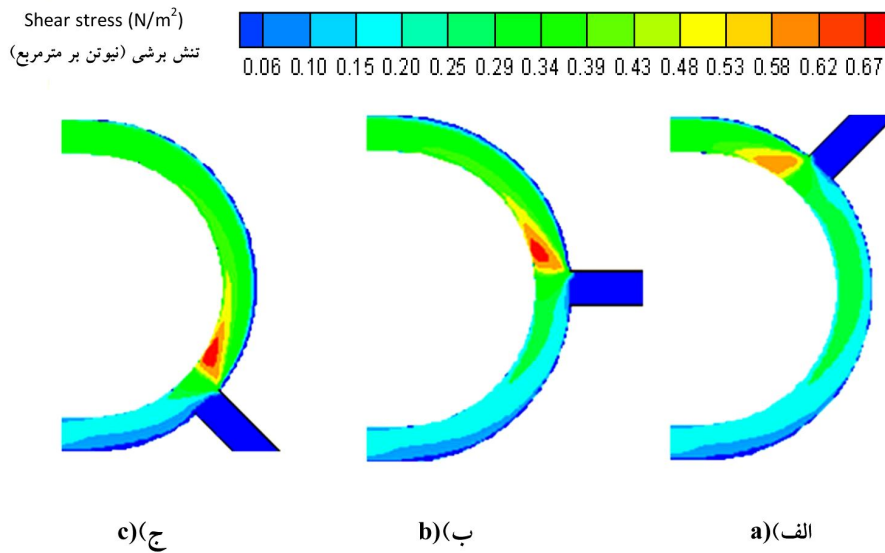


شکل ۱۳- تغییرات طولی پروفیل سطح آب در امتداد جدار داخلی، خط مرکزی و جدار خارجی قوس، زاویه اتصال ۹۰ درجه (S: فاصله در طول خط مرکزی کانال از ورودی و W: عرض کانال).

Figure 13. Comparison of longitudinal profiles of water surface in 90° junction angles (S: distance from the beginning of the main channel, W: main channel width).

موقعیت اتصال کاهش می‌یابد. مقادیر حداکثر تنش برشی برای موقعیت‌های ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه به ترتیب ۰/۶۱، ۰/۵۹۴ و ۰/۵۶ نیوتون بر مترمربع می‌باشد. با افزایش موقعیت اتصال سرعت جریان کاهش یافته و به دنبال آن تنش برشی بستر نیز کاسته می‌شود. حداکثر تنش برشی بستر نهایتاً منجر به فرسایش بیشتر در محل اتصال خواهد شد. با افزایش موقعیت اتصال از ۴۵ به ۱۳۵ درجه حداکثر تنش برشی بستر در محل اتصال حدود ۸ درصد کاهش می‌یابد.

تأثیر موقعیت تلاقی بر توزیع تنش برشی بستر: بررسی چگونگی تغییرات بستر نیاز به مطالعه توأم جریان سیال و رسوبات بستر، و هم‌چنین اندرکنش آن‌ها دارد اما با در نظر گرفتن چگونگی تنش برشی کف، تا اندازه‌ای می‌توان الگوی فرسایش و رسوبگذاری را برای بستر متحرک پیش‌بینی کرد. در شکل ۱۴ نتایج مربوط به تنش برشی در سه موقعیت مذکور آورده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص می‌باشد ابعاد نواحی با تنش برشی حداکثر هم‌چنین مقدار حداکثر تنش برشی بستر، با افزایش



شکل ۱۴- بررسی تأثیر موقعیت تلاقی بر تنش برشی در کف (N/m^2) در زاویه اتصال ۹۰ درجه (الف: ۱۳۵ درجه، ب: ۹۰ درجه و ج: ۴۵ درجه).

Figure 14. Investigation of the effect of lateral channel junction position on bed shear stress (N/m^2) (a: 135°; b: 90°; c: 45°).

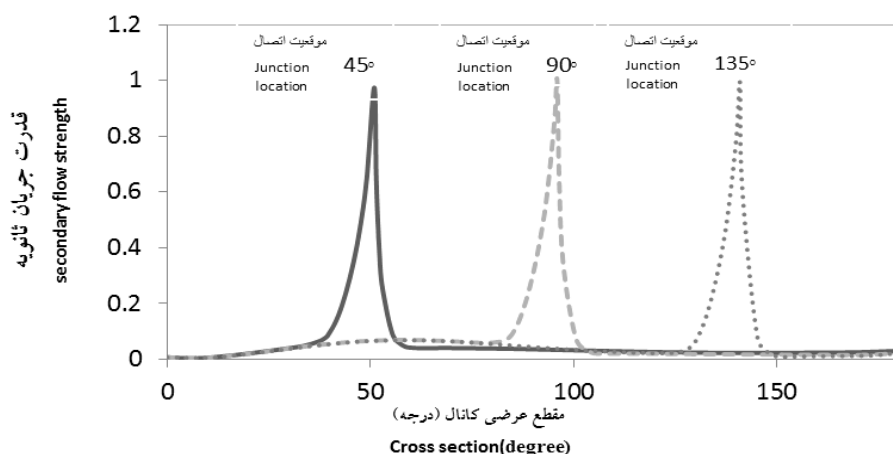
که در آن، u و v به ترتیب مؤلفه‌های طولی و عرضی سرعت در سلول‌های مقطع مورد نظر و da سطح مقطع هر یک از سلول‌های آن مقطع خواهد بود. در شکل ۱۵ قدرت جریان ثانویه برای هر سه موقعیت تلاقی نشان داده شده است. در محل تلاقی به دلیل ورود جریان از کانال فرعی به داخل کانال اصلی و افزایش سرعت عرضی در محل تلاقی، صورت کسر

تأثیر موقعیت تلاقی بر قدرت جریان ثانویه: مفهوم قدرت جریان ثانویه برای بررسی روند استهلاک جریان ثانویه در طول قوس کانال استفاده می‌شود که موسونی و گوتز (1973) آن را به صورت زیر تعریف کردند:

$$i_{SP} = \frac{\int v^2 da}{\int u^2 da} \quad (7)$$

می‌کند. برای موقعیت‌های اتصال کانال فرعی در ۹۰ و ۱۳۵ درجه یک افزایش نسبی قدرت جریان ثانویه در حوالی ۶۰ درجه از ابتدای قوس مشاهده می‌شود و سپس روند کاهشی تا محل تلاقی مشاهده می‌شود.

رابطه ۷ به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است در محل تلاقی قدرت جریان ثانویه به حداکثر مقدار خود در طول قوس می‌رسد و در محل تلاقی برای هر سه موقعیت مذکور تغییرات قدرت جریان ثانویه روند یکسانی را طی



شکل ۱۵- تاثیر موقعیت اتصال بر قدرت جریان ثانویه.

Figure 15. The effect of lateral channel junction position on secondary flow strength.

مقابل افزایش موقعیت اتصال باعث کاهش حداکثر ۸ درصدی سرعت طولی جریان می‌شود.

۲. افزایش موقعیت اتصال کانال فرعی باعث کاهش اختلاف تراز سطح آب بالادست و پایین‌دست می‌شود. این اختلاف در مجاور دیوار خارجی قوس (مجاور اتصال) بیش‌تر است.

۳. افزایش موقعیت تلاقی از ۴۵ به ۱۳۵ درجه حداکثر تنش برشی بستر در محل اتصال حدود ۸ درصد کاهش می‌یابد.

۴. بررسی قدرت جریان ثانویه در طول کانال اصلی نشان می‌دهد که در محل تلاقی به دلیل ورود جریان از کانال فرعی به داخل کانال اصلی و افزایش سرعت عرضی در محل تلاقی، قدرت جریان ثانویه به مقدار زیادی افزایش می‌یابد اما تغییر موقعیت اتصال کانال فرعی تأثیر چشم‌گیری بر شدت جریان ثانویه ندارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به استفاده از مدل عددی SSIM1 به بررسی تأثیر موقعیت اتصال کانال فرعی بر الگوی جریان در یک قوس ۱۸۰ درجه پرداخته شد. بدین منظور با قرار گیری کانال فرعی در موقعیت‌های ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه از ابتدای قوس و زاویه اتصال ۹۰ درجه در امتداد راستای جریان در کانال اصلی الگوی جریان در محل تلاقی جریان‌های کانال فرعی و اصلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند:

۱. پروفیل‌های قائم سرعت طولی جریان نشان داد در محدوده ناحیه جداشدگی (قوس خارجی بعد از محل تلاقی) با افزایش فاصله اتصال کانال فرعی از ابتدای قوس (از ۴۵ به ۱۳۵ درجه) مقدار سرعت طولی حداکثر مقدار سرعت طولی حداکثر ۵۶ درصد در نزدیک بستر افزایش می‌یابد در حالی که در ساحل

منابع

1. Alamatian, A., and Jafarzadeh, M.R. 2010. Simulation of supercritical flood flow at the junction channels. 5 the National Congress of Civil engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran. (In Persian)
2. Baghlani, A., and Talebbeydokhti, N. 2013. Hydrodynamics of right-angled channel confluences by 2D numerical model. *J. Trans. Civil Engin.* 37: 271-283.
3. Biron, P.M., Ramamurthy, A.S., and Han, S. 2004. Three-Dimensional Numerical Modeling of Mixing at River Confluences. *J. Hydr. Engin. ASCE.* 130: 243-253.
4. Bradbrook, K.F., Lane, S.N., Richards, K.S., Biron, P.M., and Roy, A.G. 2001. Role of bed discordance at asymmetrical river confluences. *J. Hydr. Engin.* 127: 5. 351-368.
5. Basiri, M. 2014. Three-dimensional simulation of local scouring and sedimentation at rectangular channel-confluences by CFD modeling. M.Sc. Thesis, Razi University, Kermanshah. (In Persian)
6. Chen, S.C., and Peng, S.H. 2006. Two-dimensional numerical model of two-layer shallow water equations for confluence simulation. *Advances Water Resources*, 29: 11. 1608-1617.
7. Ghobadian, R. 2008. The study effect of tailwater level changes on secondary currents at rectangular channels confluence with a Three-Dimensional model. In: 4th National congress of Civil engineering. Tehran University, Tehran, Iran. (In Persian)
8. Ghostine, R., Kesserwani, G., Mosel, R., Vazquez, J., Ghenaim, A., and Gregoire, C. 2009. A numerical simulation of transitional flow at open channel junction. *Int. J. Num. Fluid.* 61: 752-767.
9. Habibi, S., Rostami, M., and Mousavi, S.A. 2014. Numerical simulation of flow and sediment structure in confluence of rivers. *Iran-Watershed Management.* 8: 24. 19-28. (In Persian)
10. Hong, S.W., and Kim, C. 2011. A new finite volume method on junction coupling and boundary treatment for flow network system analyses. *Int. J. Num. Fluid.* 65: 707-742.
11. Huang, J.L., Weber, L.J., and Yong, G.L. 2002. Three-Dimensional Numerical Study of Flows in Open-Channel Junctions flow. *J. Hydr. Engin. ASCE.* 128: 3. 268-280.
12. Li, C.W., and Zeng, C. 2010. Flow division at a channel crossing with subcritical or supercritical flow. *Int. J. Num. Fluid.* 62: 56-73.
13. Mansoori, A.R. 2006. 3D Numerical simulation of bed topography in 180-degree channel bend. M.Sc. Thesis, Tarbiat Modarres University, Tehran.
14. Mosonyi, E., and Gotz, W. 1973. Secondary currents in subsequent model bends. *International Symposium on River Mechanics, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.* 1: 191-201.
15. Pirestani, M. 2004. Investigation on flow field and scouring at lateral intake in channel bends. Ph.D. Thesis, Islamic Azad University, South Tehran Branch.
16. Riley, J.D., and Rhoads, B.L. 2012. Flow structure and channel morphology at a natural confluent meander bend. *Geomorphology.* 163-164: 84-982.
17. Roberts, M.V.T. 2004. Flow Dynamics at Open Channel Confluent-Meander Bends. Ph.D. thesis, The University of Leeds, United Kingdom2.
18. Weber, L.J., Schumate, E.D., and Mawer, N. 2001. Experimentals on flow at a 900 open-channel Junction. *J. Hydr. Engin. ASCE.* 127: 340-350.
19. Yang, Q.Y., Liu, T.H., Lu, W.Z., and Wang, X.K. 2013. Numerical simulation of Confluence Flow in Open channel with Dynamic Meshes Techniques. Hindawi Publishing Corporation *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2013. No. 860431.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(6), 2016
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Numerical investigating of the effect of lateral channel junction position on flow pattern at river bend

***R. Ghobadian¹ and Z. Seyedi Tabar²**

¹Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Razi University of Kermanshah,

²M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, Razi University of Kermanshah

Received: 11/12/2014; Accepted: 06/15/2015

Abstract

Background and Objectives: Rivers run in a sinus curve pattern usually and have a direct pathway rarely. Joining lateral channel to main channel at a bend location changes completely the conventional flow pattern at river bend. Recent flow pattern not only is affected by centrifugal force and stream and spin wise pressure gradient but also by momentum of lateral channel flow. Exact recognizing of this phenomenon needs extended studies.

Materials and Methods: In this study using SSIIM1 model the effect of three position of straight lateral channel that is connected to a U bend at 45, 90 and 135 degree from the start of bend with a 90 degree confluence angle on flow velocity, variation of water surface elevation, shear stress distribution and helical flow strength was considered.

Results: The results indicated by increasing the junction position from 45 to 135 degree from the bend start, stream wise flow velocity near the outer wall of the bend increases maximum %56 while near the inner wall of the bend decreases %8.

Conclusion: Maximum difference between the upstream and downstream flow depth around confluence area at 45 degree position was equal to %6.15 of tailwater depth. For position of 135 degree from the bend start this difference was about %5.4 of tailwater depth. Additionally the results indicated shear stress at confluence area increases %8 when the position of junction angle change from 45 to 135 from start of bend.

Keywords: Flow pattern, Junction position, U bend, SSIIM 1 model, Lateral channel

* Corresponding Author; Email: rsgkobadian@gmail.com