

مطالعه عددی اثر زاویه اریب در کانال مرکب با سیلابدشت‌های مورب بر اندرکنش بین جریان در کانال

اصلی و سیلابدشت‌ها*

(یادداشت پژوهشی)

بهرام رضائی^(۲)محمد مهدی سیف^(۱)

چکیده در این تحقیق تلاش شده است که میدان جریان شامل توزیع سرعت و تنش برشی مرزی در کانال‌های مرکب با سیلابدشت‌های مورب برای دو زاویه اریب ۵/۱ و ۹/۲ درجه و عمق‌های نسبی ۰/۱۵، ۰/۲۴، ۰/۴۱ و ۰/۵۰ به صورت عددی شبیه‌سازی شود. به این منظور از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و نرم‌افزار ANSYS-CFX استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی توزیع سرعت و تنش برشی در دو مقطع انتخاب و با داده‌های به دست آمده در آزمایشگاه هیدرولیک مستقر در والینگفورد (Flood Channel Facility) کشور انگلستان مقایسه شده است. بررسی‌ها نشان‌دهنده انطباق قابل قبول بین داده‌های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی می‌باشد. با کمک معادلات اندازه حرکت توسعه داده شده برای حجم کنترل‌هایی در سیلابدشت‌ها، اندرکنش بین جریان در کانال اصلی و سیلابدشت‌ها برای زوایای اریب و عمق‌های نسبی مختلف، مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان‌دهنده آن است که عموماً به دلیل تبادل جرم بین کانال اصلی و سیلابدشت‌ها با افزایش زاویه اریب و عمق آب، نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین جریان در کانال اصلی و سیلابدشت‌ها افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی شبیه‌سازی عددی، کانال مرکب با سیلابدشت‌های مورب، مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ ، نیروی برشی ظاهری.

Numerical Study on the Effects of the Floodplains Angles on Interaction between the Main Channel and Floodplains in Skewed Compound Channels

M. M. Seif

B. Rezaei

Abstract In this research an attempt has been made to model flow field in compound channel with skewed floodplains for two skew angles of 5.1° and 9.2° and relative depths of 0.15, 0.24, 0.41 and 0.50. For numerical modelling the $k-\varepsilon$ turbulence model and the ANSYS-CFX software were used. The results of numerical modelling of the velocity and boundary shear stress distributions at two selected sections were then compared to the Flood Channel Facility Experimental Data. The study shows that more or less there are good between the experimental data and the results of numerical modelling. Using the momentum equations for the control volumes on the floodplains, the interaction between flow in the main channel and on the floodplains for different skew angles and relative depths has been investigated. The study indicates that in general by increasing the skew angle and water depth due to mass exchange between the subsections, the apparent shear forces at the vertical interface between the main channel and floodplains increases.

Key Words Numerical modeling, Skewed compound channels, $k-\varepsilon$ turbulence model, Apparent shear force.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶۷/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۳/۲۹ می‌باشد.

(۱) فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه بوعلی سینا.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا.

Email: b.rezaei@basu.ac.ir

مقدمه

در طبیعت، نهر طبیعی مستقیم با مقطع عرضی منظم به‌ندرت یافت می‌شود. شکل مقطع و پروفیل طولی رودخانه‌ها به وسیله عوامل مختلفی نظیر مشخصات خاک، شرایط توپوگرافی منطقه، رژیم رودخانه و حمل رسوب در طی قرن‌ها شکل داده شده‌است. بنابراین رودخانه‌ها دارای شکل مقطع عرضی کاملاً پیچیده با سیلاب‌دشت‌های غیرمنشوری می‌باشند. سیلاب‌دشت‌ها همواره به دلایل مختلف نظیر داشتن خاک حاصل-خیز و نزدیکی به ساحل رودخانه مورد توجه بشر قرار داشته و بسیاری از تمدن‌ها در ساحل رودخانه‌های بزرگ شکل گرفته‌اند؛ بنابراین آشنایی با هیدرولیک جریان در سیلاب‌دشت‌ها برای تأمین حفاظت جان انسان‌ها و نیز سازه‌ها و تأسیسات موجود در این نواحی لازم و ضروری است.

در کانال‌های مرکب، توزیع عرضی سرعت تحت تأثیر بالا بودن ضریب زبری بستر و عمق کم جریان سیلاب‌دشتی، به شکل قابل ملاحظه‌ای حالت غیریکنواخت دارد. به دلیل اختلاف سرعت بین جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، یک لایه برشی در فصل مشترک این نواحی تشکیل می‌شود و در نتیجه آن گردهای بزرگ مقیاس با محور قائم و نیز جریان ثانویه مارپیچی شکل در جهت طولی ایجاد می‌شود (تومیناگا و نزو [1]). این در حالی است که در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب به دلیل تبادل جرم و اندازه حرکت از سیلاب‌دشت‌ها به کانال اصلی و برعکس، آشفتگی‌های با مقیاس به مراتب بزرگ‌تر در فصل مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها به وجود می‌آید.

جیمز و بارونز [2] نخستین محققانی بودند که به بررسی آزمایشگاهی جریان در یک کانال مرکب با کانال اصلی مورب نسبت به سیلاب‌دشت‌ها پرداختند. آنها دریافتند که به دلیل تبادل جرم، شتاب جریان در سیلاب‌دشت واگرا افزایش می‌یابد درحالی که در

سیلاب‌دشت همگرا کاهش می‌یابد.

الیوت [3]، الیوت و سلین [4] و سلین [5] با استفاده از تجهیزات مستقر در والینگفورد FCF (Flood Channel Facility)، به صورت آزمایشگاهی جریان در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که توزیع سرعت و تنش برشی مرزی در کانال اصلی و سیلاب-دشت‌ها به شدت تحت تأثیر جریان عرضی مبادله شده بین این نواحی قرار دارد. آنها همچنین با استفاده از معادلات اندازه حرکت، نیروهای عمل‌کننده بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. چلبک [6] داده‌های به دست آمده توسط الیوت [4] و سلین [5] را مجدداً تجزیه و تحلیل نمود و با نتایج به دست آمده از فلوم ۱۸ متری مستقر در دانشگاه بیرمنگهام مورد مقایسه قرار داد.

در رابطه با شبیه‌سازی عددی پزینگا [7] با استفاده از مدل غیرخطی $k-\varepsilon$ به شبیه‌سازی میدان جریان در یک کانال مرکب منشوری پرداخت، او دریافت که مدل آشفتگی مورد نظر قادر به پیش‌بینی جریان ثانویه ناشی از تنش آشفتگی غیرایزوتروپ است. بسیاری از محققان مانند وو و همکاران [8]، فیسچر-آنتز و همکاران [9] و راماش‌واران و نادن [10] برای شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در کانال‌های باز مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ را ترجیح داده‌اند. کانگ و چوی [11] به مطالعه جریان در یک کانال مرکب منشوری با استفاده از مدل آشفتگی تنش رینولدز (Reynolds Stress Model) پرداختند. آنها برای راستی‌آزمایی نتایج شبیه‌سازی عددی، از داده‌های تومیناگا و نزو [1] استفاده کردند.

کوکالجات [12] جریان در کانال‌ها را با استفاده از دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و مدل تنش انتقالی رینولدز (Reynolds Stress Transport model) شبیه‌سازی کرد. او دریافت که مدل تنش انتقالی رینولدز قادر است که موقعیت و قدرت سلول‌های جریان ثانویه و نیز

اصلی و سیلاب دشت‌ها مورد مطالعه قرار گیرد.

معرفی کانال مرکب با سیلاب دشت‌های مورب

کانال مدل شده مشابه کانال آزمایشگاهی FCF مستقر در والینگفورد و مورد استفاده به وسیله الیوت و سلین [4] است که دارای شیب $10^{-3} \times 1/0.27$ ، طول ۵۵ متر، عرض $5/6$ متر و از جنس بتنی صاف است. به منظور انجام آزمایش بر روی کانال مرکب با سیلاب دشت‌های مورب، مقطع عرضی به شکل مرکب ذوزنقه‌ای شکل با کانال اصلی به عرض $1/5$ متر، عمق $0/15$ متر و شیب دیواره $1:1$ تغییر شکل داده شده است. هم‌چنین برای ایجاد سیلاب دشت‌های مورب، دیواره‌های متحرک در کانال نصب شده است. شکل‌های (۱) و (۲) تصویر عمومی، نمای شماتیک و مقطع عرضی کانال آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان می‌دهند.

اندازه‌گیری سرعت نقطه‌ای در دو مقطع شماره ۱ و ۲ به فواصل ۱۰ متری از یکدیگر، با استفاده از سرعت‌سنج پروانه‌ای با قطر خارجی ۱۴ میلی‌متر، در فواصل عرضی به ترتیب ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متری در کانال اصلی و سیلاب دشت‌ها و نیز فواصل ارتفاعی ۱۰ میلی‌متری انجام شده است. هم‌چنین به منظور برآورد اندازه حرکت مبادله شده بین کانال اصلی و سیلاب دشت‌ها، در فواصل طولی ۱ متری، مقادیر سرعت در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب دشت‌ها اندازه‌گیری شده است.

تنش برشی موضعی مرزی نیز با استفاده از لوله پرستون به قطر خارجی $4/02$ میلی‌متر در پیرامون محیط ترشده کانال با فاصله‌های ۵۰ میلی‌متری بر روی دیواره‌ها و نواحی نزدیک دیواره‌ها و ۱۰۰ میلی‌متری در کف کانال اصلی و سیلاب دشت‌ها اندازه‌گیری شده است. این اندازه‌گیری در همان مقطعی که سرعت متوسط در عمق به دست آمده، انجام شده است.

نقش آن را در جابه‌جایی موقعیت سرعت حداکثر به ناحیه‌ای در زیر سطح آب، پیش‌بینی کند، اما در مقابل مدل‌های غیرخطی $k-\epsilon$ قادر به انجام این امر نمی‌باشند.

رایت و همکاران [13] مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و مدل‌های مختلف تنش رینولدی را برای مطالعه مشخصات جریان در یک کانال با مقطع عرضی ذوزنقه‌ای به کار برد. نتایج این بررسی نشان داد درحالی‌که همه مدل‌های آشفتگی مشخصات کلی جریان را به شکل یکسان و مشابه پیش‌بینی می‌کنند، اما نتایج آنها در شبیه‌سازی جریان ثانویه کاملاً متفاوت است.

بیمن [14] با استفاده از مدل آشفتگی شبیه‌سازی گردابه بزرگ (Large Eddy Simulation) به شبیه‌سازی جریان در کانال اصلی و جریان سیلاب دشتی پرداخت. نتایج شبیه‌سازی گردابه بزرگ نشان داد که این مدل با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه در جریان‌های درون کانال اصلی و خارج آن (جریان سیلاب دشتی) می‌باشد.

رضائی و امیری [15] به شبیه‌سازی جریان در کانال مرکب با سیلاب دشت‌های همگرا پرداختند. بدین منظور آنها با کمک نرم‌افزار ANSYS و با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ توزیع سرعت و تنش برشی را برای کانال مرکب غیرمنشوری با دو هندسه متفاوت مورد بررسی و با داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ توانایی شبیه‌سازی توزیع سرعت و تنش برشی را با دقت قابل قبولی دارد و نیز می‌تواند وجود سلول‌های جریان ثانویه در کانال اصلی ناشی از انتقال جرم از سیلاب دشت‌ها را به خوبی پیش‌بینی نماید.

در این تحقیق سعی بر این شده است که میدان جریان در کانال مرکب با سیلاب دشت‌های مورب (زوایای اریب $5/1$ درجه و $9/2$ درجه) به کمک مدل آشفتگی $k-\epsilon$ شبیه‌سازی و اندرکنش جریان بین کانال

۰/۲۶۰، ۰/۳۶۰، ۰/۷۰۰ و ۱/۱۰۰ متر مکعب بر ثانیه متناظر با عمق های نسبی $(Dr=(H-h)/H)$ ۰/۱۵، ۰/۲۴، ۰/۴۱ و ۰/۵۰ انجام شده و با داده های آزمایشگاهی FCF سری A14 و A15 مقایسه شده است (در این رابطه H عمق آب و h عمق کانال اصلی نسبت به سیلاب دشت ها است).



شکل ۱ تصویری از کانال مرکب با سیلاب دشت های مورب (زاویه اریب ۵/۱ درجه) مستقر در والینگفور

شبیه سازی عددی جریان در کانال مرکب با

سیلاب دشت های مورب

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت است. این معادلات برای جریان آشفته ماندگار سیال تراکم ناپذیر به صورت تانسوری زیر نوشته می شوند:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) = \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} \quad (2)$$

برای در نظر گرفتن اثرات مربوط به آشفتگی روی مؤلفه های سرعت و فشار، جریان به صورت مجموع مؤلفه های متوسط و نوسانی جای گذاری شده اند.

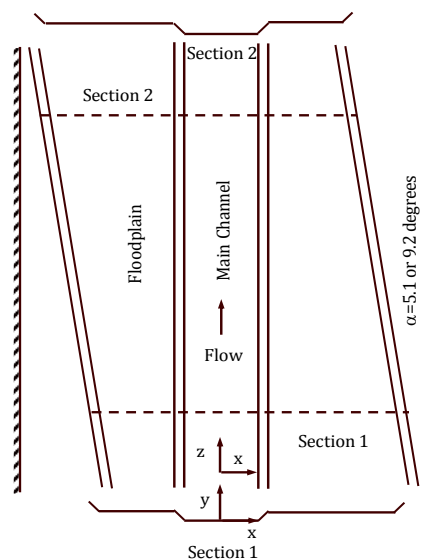
$$u_i = U_i + u'_i \quad (3)$$

$$p = P + p' \quad (4)$$

در این معادلات U_i مؤلفه سرعت متوسط، P فشار متوسط، μ لزجت سیال، ρ جرم مخصوص سیال، $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ تنش های رینولدز است و با استفاده از مدل آشفتگی لزجت گردابه ای بوسینیسک به صورت زیر محاسبه می گردد.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

در معادله فوق نیز μ_t لزجت آشفتگی، k انرژی جنبشی آشفتگی و δ_{ij} دلتای کرونکر می باشد.



شکل ۲ نمای بالا و مقطع عرضی کانال مرکب با سیلاب دشت های مورب

دینامیک سیال محاسباتی یک ابزار محاسباتی قوی برای شبیه سازی میدان جریان در سیالات و پدیده انتقال حرارت در فرایندهای فیزیکی است. این روش با حل عددی معادلات متوسط گیری شده ناویر-استوکس در یک میدان مشخص با شرایط مرزی تعریف شده عمل می کند.

میدان جریان مدل شده در این تحقیق، کانالی است به طول ۵۵ متر و عرض ۵/۶ متر، عرض کانال اصلی ۱/۵ متر و سیلاب دشت های مورب با دو زاویه اریب ۵/۱ و ۹/۲ درجه. شبیه سازی برای دبی های

مشخصات شبکه بندی انجام شده

هندسه کانال با استفاده از نرم افزار ICEMCFX ساخته و شبکه بندی شده است. برای شبکه بندی کانال مورد نظر از شبکه بی قاعده استفاده شده است. سعی بر این شده که در ایجاد شبکه، المان های مربوط به دیواره کانال اصلی و سیلاب دشت ها و هم چنین فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب دشت ها به دلیل تغییرات شدید سرعت، ریزتر و در سایر نواحی درشت تر انتخاب شوند.

برای بررسی تأثیر اندازه شبکه بر روی شبیه سازی جریان سه نوع شبکه بندی ریز، متوسط و درشت برای کانال مرکب با سیلاب دشت مورب (زاویه اریب ۵/۱ درجه) ایجاد شد. ابعاد عناصر سه نوع شبکه طوری انتخاب شده است که نسبت آنها از ۱/۳ پیشنهادی توسط سلیک و همکاران [16] کوچک تر نباشد. در شکل (۳) نمای شماتیک سه بعدی از شبکه بندی نشان داده شده است. با استفاده از مدل آشفتگی k-ε و دبی ۰/۳۶۱ متر مکعب در ثانیه، سرعت متوسط در عمق در مقطع شماره ۱ برای هر سه نوع شبکه بندی درشت، متوسط و ریز به صورت عددی شبیه سازی و با یکدیگر مقایسه شده اند (شکل ۴). همان طور که در شکل دیده می شود با افزایش تعداد گره ها از ۲/۲ میلیون (شبکه درشت) به تقریباً ۳ میلیون (شبکه متوسط) نتایج شبیه سازی به صورت ملموسی تغییر نمی کند؛ ولی با افزایش تعداد گره ها به ۳/۹ توزیع سرعت متوسط در عمق به مقدار خیلی جزئی در کانال اصلی کاهش و سیلاب دشت سمت راست (سیلاب دشت همگرا) افزایش می یابد.



شکل ۳ نمای شماتیک سه بعدی شبکه

معادلات ناویر- استوکس به صورت متوسط گیری شده در زمان یک دستگاه معادله دیفرانسیل متشکل از چهار معادله با ده مجهول (شامل چهار مجهول U_i و P و شش مجهول تنش های رینولدز $(-\rho \overline{u_i u_j})$) است. با استفاده از مدل آشفتگی لزجت گردابه ای بوسینیک شش معادله اضافی به دست می آید و دستگاه معادلات تکمیل می شود.

معرفی مدل آشفتگی k-ε

در این مدل، k انرژی جنبشی آشفتگی است و واریانس نوسانات در سرعت تعریف می شود و ε پراکندگی (اتلاف) آشفتگی گردابه ای می باشد (نرخه که در آن نوسانات سرعت تلف می گردد). مدل k-ε دو متغیر جدید در سیستم معادلات وارد می کند. در مدل k-ε فرض می شود که لزجت آشفتگی به انرژی جنبشی آشفتگی و اتلاف انرژی آشفتگی از طریق معادله زیر مربوط می شود:

$$\mu_t = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

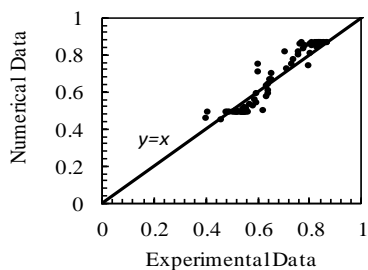
که C_{μ} ثابت است و برابر ۰/۰۹ می باشد. مقادیر k و ε به صورت مستقیم از معادلات دیفرانسیل انتقال نرخ انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ پراکندگی آشفتگی به دست می آید.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (7)$$

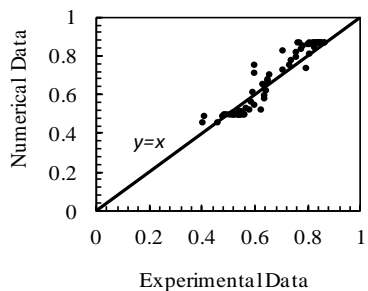
$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{s1} P_k - C_{s2} \rho \varepsilon) \quad (8)$$

در روابط فوق C_{s1} ، C_{s2} ، σ_k و σ_ε ثابت هایی هستند که به ترتیب برابر ۱/۴۴، ۱/۹۲، ۱ و ۱/۳ می باشند. P_k نیز معرف تولید آشفتگی به وسیله نیروهای لزجت و شناوری بوده و به شکل زیر مدل می شود:

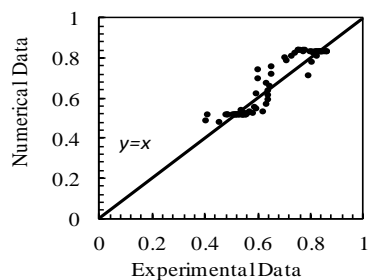
$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (9)$$



(الف) شبکه درشت



(ب) شبکه متوسط



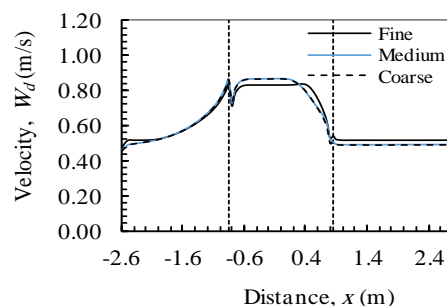
(ج) شبکه ریز

شکل ۵ نمودار پراکندگی سرعت متوسط در عمق در اطراف خط ایده آل برای سه نوع شبکه انتخابی

شرایط مرزی

میدان جریان شامل توزیع سرعت و تنش برشی، با استفاده از مدل آشفتگی k-ε و نرم افزار ANSYS CFX و با دقت 1×10^{-4} حل شده است. شرایط مرزی به قرار زیر است:

- (۱) توزیع یکنواخت سرعت در ورودی فلوم، (۲) شرایط توزیع فشار هیدرواستاتیک در خروجی، (۳) از آنجایی که بدنه فلوم از بتن صاف ساخته شده است، زبری دیواره ها و کف فلوم ۰/۱ میلی متر انتخاب شده است.



شکل ۴ مقایسه سرعت متوسط در عمق شبیه سازی شده در مقطع شماره ۱ برای سه نوع شبکه درشت، متوسط و ریز

به منظور مقایسه نتایج شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی، پراکندگی زوج مرتب های داده های آزمایشگاهی و عددی در اطراف خط ایده آل $y=x$ ترسیم و در شکل های (۵) نشان داده شده است. بررسی شکل ها نشان می دهد که با افزایش تعداد گره ها و در نتیجه کاهش ابعاد شبکه، پراکندگی نقاط در اطراف خط ایده آل در ابتدا به مقدار جزئی کاهش ولی با ریزتر کردن شبکه این پراکندگی افزایش می یابد که به مفهوم کاهش دقت شبیه سازی عددی است.

از طرف دیگر افزایش تعداد گره ها به مفهوم طولانی شدن زمان اجرای برنامه نیز خواهد بود، بنابراین به منظور افزایش دقت شبیه سازی عددی و کاهش زمان اجرا، شبکه با اندازه متوسط انتخاب شده است.

جدول ۱ جزئیات شبکه بندی متوسط به کار رفته برای شبیه سازی عددی

ناحیه	تعداد نقاط	حداکثر طول (m)	حداقل طول (m)
A	۷۰	۰/۰۴	۰/۰۱
B	۲۰	۰/۰۱۱	۰/۰۱
C	۲۰	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳
D	۱۵۰	۰/۰۶۲	۰/۰۱

نتایجی که از بررسی شکل‌ها می‌توان گرفت به قرار زیر است:

۱. انطباق نسبتاً قابل قبولی بین توزیع سرعت اندازه‌گیری شده و داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی عددی وجود دارد فقط در مورد آزمایش A15-2 مدل آشفتگی $k-\epsilon$ توزیع سرعت در سیلاب‌دشت همگرا را در مقطع شماره ۱ زیاد، و در کانال اصلی به مقدار جزئی کم برآورد کرده است.

۲. سرعت‌ها در سیلاب‌دشت سمت چپ (سیلاب-دشت واگرا) معمولاً بزرگ‌تر از سیلاب‌دشت سمت راست (همگرا) است که این امر می‌تواند ناشی از تغییر شکل هندسی کانال باشد که سبب خروج جریان از سیلاب‌دشت همگرا و ورود آن به سیلاب‌دشت واگرا می‌شود.

۳. سرعت‌های ماگزیمم به جای وسط کانال اصلی در نزدیکی فصل مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت واگرا (دریافت‌کننده جریان) اتفاق افتاده و تقریباً ۵۰ درصد بزرگ‌تر از متوسط سرعت در این سیلاب‌دشت است.

۴. با افزایش زاویه اریب سیلاب‌دشت‌ها از ۵/۱ درجه به ۹/۲ درجه اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی افزایش می‌یابد.

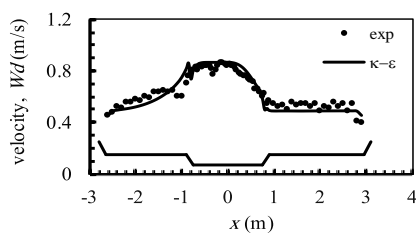
هم‌چنین مقادیر میانگین قدر مطلق خطای نقطه‌ای بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه شده است. مقدار متوسط این خطاها برای آزمایش‌های سری A14 در مقاطع اندازه‌گیری ۱ و ۲ به ترتیب ۷/۴ درصد و ۴/۹ درصد و برای آزمایش‌های سری A15 در همان مقاطع به ترتیب ۷/۵ و ۵ درصد می‌باشد.

$$\%W_{reor} = \frac{\sum \left| \frac{W_{num} - W_{exp}}{W_{exp}} \right| \times 100}{N} \quad (10)$$

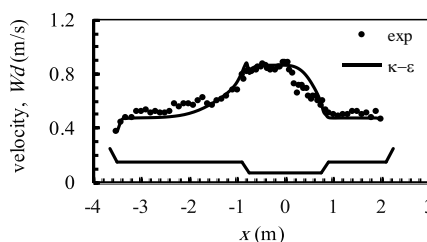
ارائه نتایج

توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق

توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق برای آزمایش‌های سری A14 و A15 با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ در دو مقطع ۱ و ۲، محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهی در همان مقطع مقایسه شده است (شکل‌های (۶) و (۷) را ببینید).

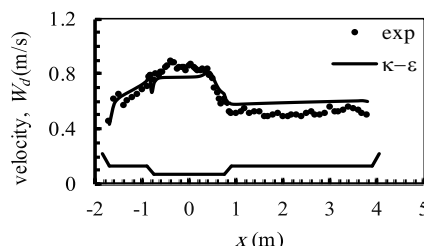


(a) Section 1

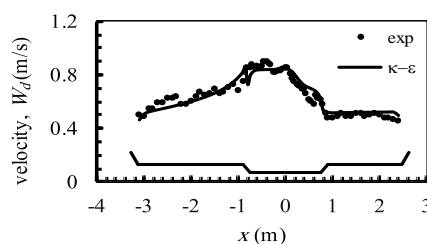


(b) Section 2

شکل ۶ توزیع عرضی سرعت در مقاطع ۱ و ۲ برای کانال مرکب مورب آزمایش سری A14-2

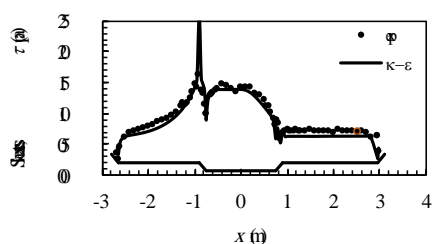


(a) Section 1

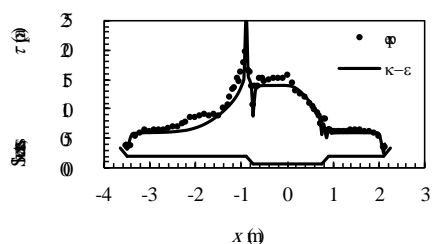


(b) Section 2

شکل ۷ توزیع عرضی سرعت در مقاطع ۱ و ۲ برای کانال مرکب مورب آزمایش سری A15-2

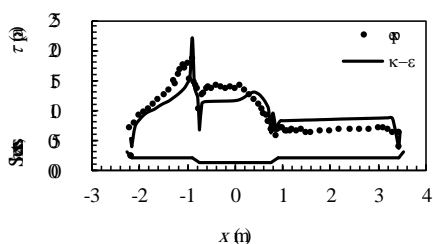


(a) Section 1

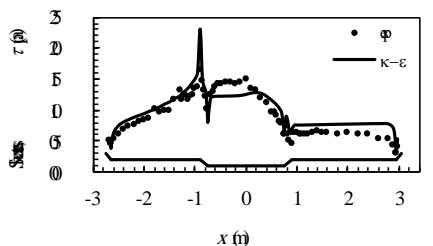


(b) Section 2

شکل ۸ توزیع تنش برشی مرزی در مقاطع ۱ و ۲ برای کانال مرکب مورب آزمایش سری A14-2



(a) Section 1



(b) Section 2

شکل ۹ توزیع تنش برشی مرزی در مقاطع ۱ و ۲ برای کانال مرکب مورب آزمایش سری A15-2

مقادیر میانگین قدر مطلق خطای نقطه‌ای بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی تنش برشی مرزی نیز با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه شده‌است. مقدار متوسط این خطاها در مقاطع اندازه‌گیری ۱ و ۲ برای آزمایش‌های سری A14

در این رابطه W_{num} سرعت به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و W_{exp} سرعت اندازه‌گیری شده و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

توزیع تنش برشی مرزی

تنش برشی مرزی در کانال‌ها اغلب در آنالیز سیستم-های رودخانه صرف نظر می‌شود، اما توزیع تنش برشی مرزی به دلیل این‌که در کالیبره کردن مدل‌های پیشرفته، در مطالعه تعادل نیروها و نیز در محاسبات مربوط به انتقال رسوب کاربرد دارد، از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. تنش برشی می‌تواند به عنوان معیاری برای تعیین محل سلول جریان ثانویه و نیز محل فرسایش و رسوب‌گذاری در کانال‌های طبیعی به کار رود.

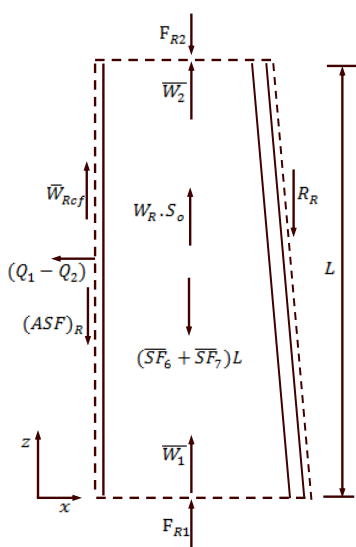
با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ تنش برشی مرزی در کانال اصلی و سیلابدشت‌ها برای دو زاویه اریب $5/1$ و $9/2$ درجه محاسبه و با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده‌است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی برای آزمایش‌های سری A14-2 و A15-2 در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده‌است. بررسی تنش‌های برشی مرزی نشان داده شده در این شکل‌ها دلالت بر وجود نقطه پیک در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلابدشت‌ها سمت چپ (سیلابدشت واگرا) دارد. این نقطه ماگزیمم دارای مقداری به اندازه تقریباً $2/5$ برابر تنش برشی متوسط در کانال است. شدت تنش برشی در سیلابدشت سمت راست (سیلابدشت همگرا) تقریباً ثابت است. مشابه این پدیده در توزیع عرضی سرعت نیز مشاهده شده‌است. در مورد تنش برشی مرزی نیز با افزایش زاویه اریب از $5/1$ درجه به $9/2$ درجه اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی افزایش و دقت مدل آشفتگی $k-\epsilon$ در شبیه‌سازی کاهش می‌یابد.

نیروی عکس‌العمل دیواره در راستای محور z ، \overline{SF}_6 و \overline{SF}_7 متوسط نیروهای برشی در واحد طول کانال وارد بر کف و دیواره سیلاب‌دشت سمت راست (سیلاب‌دشت همگرا)، $(Mom)_{R1}$ و $(Mom)_{R2}$ اندازه حرکت سیال ورودی به حجم کنترل و خروجی از حجم کنترل در امتداد محور z ، $(Mom)_{Rcf}$ اندازه حرکت سیال خروجی از فصل مشترک بین سیلاب‌دشت و کانال اصلی در امتداد محور Z و $(ASF)_R$ نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت همگرا است. از آنجایی که عمق جریان در طول کانال اریب ثابت است، بنابراین مجموع نیروی فشار هیدرواستاتیک وارد بر مقاطع شماره ۱ و ۲ با مؤلفه نیروی عکس‌العمل دیواره در راستای جریان برابر و در خلاف جهت یکدیگر هستند، در نتیجه مجموع این سه نیرو برابر است با:

$$F_{R1} - F_{R2} - R_R = 0 \quad (14)$$

بنابراین معادله پس از ساده سازی به صورت زیر درمی‌آید.

$$W_R S_0 - (\overline{SF}_6 + \overline{SF}_7)L - (ASF)_R = (Mom)_{R2} + (Mom)_{Rcf} - (Mom)_{R1} \quad (15)$$



شکل ۱۰ نمای بالای بالای حجم کنترل بین مقاطع شماره ۱ و ۲ در سیلاب‌دشت سمت راست (سیلاب‌دشت همگرا)

به ترتیب ۱۲/۱ درصد و ۱۰/۵ درصد و برای آزمایش‌های سری A15 در همان مقاطع به ترتیب ۱۷/۱ و ۱۴/۲ درصد می‌باشد.

$$\%T_{reor} = \frac{\sum \left| \frac{\tau_{num} - \tau_{exp}}{\tau_{exp}} \right| \times 100}{N} \quad (11)$$

در این رابطه τ_{num} تنش برشی مرزی به دست آمده از شبیه‌سازی عددی و τ_{exp} تنش برشی اندازه‌گیری شده و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

نیروهای برشی ظاهری

با مطالعه نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها می‌توان به مطالعه اندرکنش بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها پرداخت. به این منظور و برای تعیین نیروی برشی عمل‌کننده در هر ناحیه از کانال، محیط تر شده به تعدادی المان تقسیم و مطابق شکل (۲) نام‌گذاری شده است. تنش برشی محاسبه شده برای هر یک از المان‌ها به صورت عددی انتگرال‌گیری می‌شود تا نیروی برشی در واحد طول کانال به دست آید (رابطه ۱۲ را ببینید).

$$SF_i = \sum \tau_j \Delta x_j, \quad i = 1 \text{ to } 7 \quad (12)$$

که در این رابطه SF_i نیروی برشی در واحد طول عمل‌کننده بر ناحیه i ام، τ_j توزیع تنش برشی عمل‌کننده بر ناحیه مورد نظر (i ام) و Δx_j جزء طول در راستای محور عرضی کانال (محور x) می‌باشند.

حال مطابق شکل (۱۰) در سیلاب‌دشت همگرا و بین مقاطع ۱ و ۲ حجم کنترلی به طول L (۱۰ متر) در نظر گرفته و معادله اندازه حرکت را به شرح زیر برای آن تنظیم می‌شود.

$$F_{R1} - F_{R2} - R_R + W_R S_0 - (\overline{SF}_6 + \overline{SF}_7)L - (ASF)_R = (Mom)_{R2} + (Mom)_{Rcf} - (Mom)_{R1} \quad (13)$$

در این رابطه F_{R1} و F_{R2} نیروهای فشار هیدرواستاتیک وارد بر مقاطع شماره ۱ و ۲، R_R مؤلفه

برای حجم کنترل مشابه در سیلابدشت سمت چپ (سیلابدشت واگرا) می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} (ASF)_L &= \rho g V_L S_o - (\overline{SF}_1 + \overline{SF}_2)L + \\ &\rho(\beta_3 Q_3 \overline{W}_3 - \beta_4 Q_4 \overline{W}_4) + \rho(Q_4 - Q_3)\overline{W}_{Lcf} \end{aligned} \quad (21)$$

در رابطه فوق V_L حجم سیال در حجم کنترل سمت چپ، \overline{SF}_1 و \overline{SF}_2 نیروی برشی متوسط در واحد طول کانال وارد بر دیوار و کف سیلابدشت سمت چپ، β_3 و β_4 ضریب تصحیح اندازه حرکت سیال ورودی و خروجی، Q_3 و Q_4 دبی ورودی به و خروجی از سیلابدشت سمت چپ، \overline{W}_3 و \overline{W}_4 سرعت متوسط جریان ورودی به حجم کنترل و خروجی از حجم کنترل سمت چپ، \overline{W}_{Lcf} سرعت متوسط در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلابدشت است.

با استفاده از معادلات (۲۰) و (۲۱) نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلابدشت‌های همگرا و واگرای کانال مورب با زوایای اریب ۵/۱ درجه و ۹/۲ درجه محاسبه شده و در جدول‌های (۲) تا (۵) آورده شده است.

جملات مختلف رابطه (۱۵) از روابط زیر قابل محاسبه خواهند بود.

$$W_R S_o = \rho g V_R S_o \quad (16)$$

$$(Mom)_{R1} = \rho Q_1 \beta_1 \overline{W}_1 \quad (17)$$

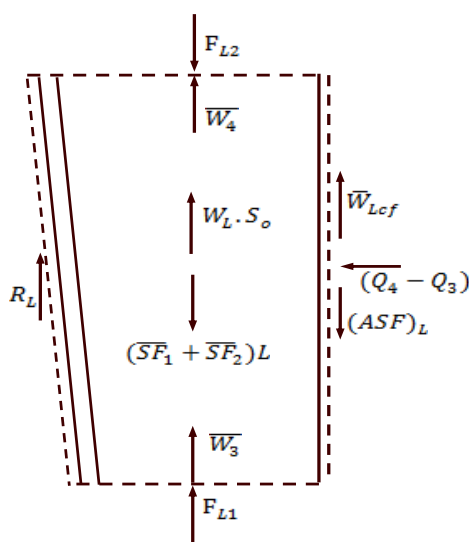
$$(Mom)_{R2} = \rho Q_2 \beta_2 \overline{W}_2 \quad (18)$$

$$(Mom)_{Rcf} = \rho(Q_1 - Q_2)\overline{W}_{Rcf} \quad (19)$$

با جای گذاری روابط فوق در معادله (۱۵) و دوباره نویسی آن خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} (ASF)_R &= \rho g V_{RL} S_o - (\overline{SF}_6 + \overline{SF}_7)L + \\ &\rho(\beta_1 Q_1 \overline{W}_1 - \beta_2 Q_2 \overline{W}_2) - \rho(Q_1 - Q_2)\overline{W}_{Rcf} \end{aligned} \quad (20)$$

در این رابطه، ρ جرم مخصوص سیال، g شتاب ثقل، V_R حجم سیال در حجم کنترل سمت راست، S_o شیب طولی کانال، β_1 و β_2 ضریب تصحیح اندازه حرکت سیال ورودی و خروجی، Q_1 و Q_2 دبی ورودی به و خروجی از سیلابدشت سمت راست، \overline{W}_1 و \overline{W}_2 سرعت متوسط جریان در مقاطع شماره ۱ و ۲، \overline{W}_{Rcf} سرعت متوسط در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلابدشت است. لازم به ذکر است که اندیس R معرف پارامترهای مربوط به سیلابدشت سمت راست است.



شکل ۱۱ نمای بالای بالای حجم کنترل بین مقاطع شماره ۱ و ۲ در سیلابدشت سمت چپ (سیلابدشت واگرا)

جدول ۲ جملات مختلف معادله اندازه حرکت برای سیلاب دشت همگرا کانال مرکب اریب با زاویه انحراف ۵/۱ درجه

Exp.	Dr	$W_R S_o$ (N)	$(\overline{SF}_6 + \overline{SF}_7)L$ (N)	$(Mom)_{R1} + (Mom)_{R2}$ (N)	$(Mom)_{Ref}$ (N)	$(ASF)_R$ (N)
A14-1	۰/۱۵	۴/۳۱	۵/۳۸	-۲/۴۳	۲/۰۵	-۰/۶۹
A14-2	۰/۲۴	۷/۹۹	۱۰/۲۴	-۱۰/۷۵	۹/۱۴	-۰/۶۴
A14-3	۰/۴۱	۱۷/۴۵	۲۲/۳۶	-۵۲/۱۶	۵۳/۴۶	-۶/۲۱
A14-4	۰/۵۰	۲۵/۳۰	۳۳/۵۱	-۱۲۰/۸	۱۱۲/۶۹	-۰/۱۱

جدول ۳ جملات مختلف معادله اندازه حرکت برای سیلاب دشت واگرا کانال مرکب اریب با زاویه انحراف ۵/۱ درجه

Exp.	Dr	$W_L S_o$ (N)	$(\overline{SF}_1 + \overline{SF}_2)L$ (N)	$-(Mom)_{L1} + (Mom)_{L2}$ (N)	$(Mom)_{Lef}$ (N)	$(ASF)_L$ (N)
A14-1	۰/۱۵	۵/۷۴	۱۰/۷۸	۲/۰۶	۳/۸۷	-۲/۵۲
A14-2	۰/۲۴	۱۰/۶۳	۱۸/۸۵	۸/۵۴	۱۳/۵۷	-۳/۲۰
A14-3	۰/۴۱	۲۳/۱۲	۳۵/۴۰	۶۰/۰۹	۵۷/۲۴	-۱۵/۸۶
A14-4	۰/۵۰	۳۳/۴۰	۵۰/۱۹	۱۴۴/۲۴	۱۴۸/۳۱	-۱۲/۷۱

جدول ۴ جملات مختلف معادله اندازه حرکت برای سیلاب دشت همگرا کانال مرکب اریب با زاویه انحراف ۹/۲ درجه

Exp.	Dr	$W_R S_o$ (N)	$(\overline{SF}_6 + \overline{SF}_7)L$ (N)	$(Mom)_{R1} + (Mom)_{R2}$ (N)	$(Mom)_{Ref}$ (N)	$(ASF)_R$ (N)
A15-1	۰/۱۵	۵/۹۲	۱۰/۴۴	-۹/۶۱	۵/۹۹	-۰/۸۹
A15-2	۰/۲۴	۱۱/۱۱	۱۸/۹۲	-۲۹/۵۹	۲۲/۶۸	-۰/۸۹
A15-3	۰/۴۱	۲۴/۳۳	۳۴/۴۴	-۱۰۹/۹۰	۱۱۱/۱۵	-۱۱/۳۶
A15-4	۰/۵۰	۳۵/۴۱	۵۲/۷۱	-۲۱۸/۸۳	۲۱۱/۵۱	-۹/۹۹

جدول ۵ جملات مختلف معادله اندازه حرکت برای سیلاب دشت واگرا کانال مرکب اریب با زاویه انحراف ۹/۲ درجه

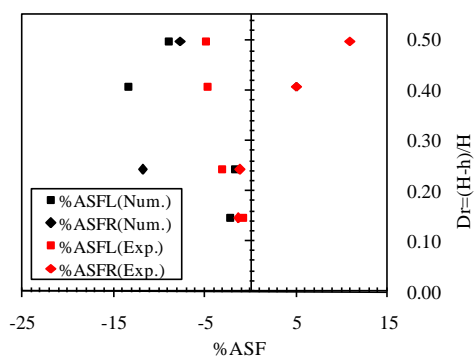
Exp.	Dr	$W_L S_o$ (N)	$(\overline{SF}_1 + \overline{SF}_2)L$ (N)	$-(Mom)_{L1} + (Mom)_{L2}$ (N)	$(Mom)_{Lef}$ (N)	$(ASF)_L$ (N)
A15-1	۰/۱۵	۳/۹۳	۱۱/۵۳	۴/۱۷	۷/۴۷	-۴/۲۹
A15-2	۰/۲۴	۷/۴۱	۱۷/۳۷	۲۴/۱۹	۲۷/۹۶	-۶/۲۰
A15-3	۰/۴۱	۱۶/۳۱	۲۵/۷۸	۱۰۹/۷۲	۱۲۳/۳۳	۴/۱۵
A15-4	۰/۵۰	۲۳/۸۵	۳۱/۴۸	۲۲۱/۹۵	۲۲۱/۰۵	-۸/۵۲

در کانال اصلی، جریان در سیلاب دشت‌ها را شتاب می‌بخشد.

۲. با افزایش عمق جریان عموماً قدر مطلق مقدار نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب دشت‌ها افزایش می‌یابد.

با بررسی و مقایسه جدول‌های فوق می‌توان نتایج زیر را استنتاج کرد:

۱. مقادیر منفی نیروی برشی ظاهری در فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و سیلاب دشت‌های همگرا و واگرا بیان‌کننده این واقعیت است که جریان سریع‌تر



شکل ۱۳ مقایسه درصد نیروی برشی ظاهری محاسبه شده با استفاده از مدل $k-\epsilon$ و داده‌های آزمایشگاهی در کانال مرکب با سیلابدشت‌های مورب $9/2$ درجه

نتیجه‌گیری

در این تحقیق میدان سرعت در یک کانال مرکب با سیلابدشت‌های مورب با زوایای $5/1$ درجه و $9/2$ درجه با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ شبیه‌سازی شده و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده‌است. مهم‌ترین نتایج حاصل از این شبیه‌سازی به شرح زیر است:

۱. مدل آشفتگی $k-\epsilon$ می‌تواند توزیع سرعت را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند.

۲. به دلیل تغییر شکل هندسی سیلابدشت‌های کانال مرکب اریب، سرعت حداکثر در نزدیکی فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلابدشت واگرا اتفاق می‌افتد.

۳. مقایسه توزیع تنش برشی مرزی شبیه‌سازی شده با مقادیر آزمایشگاهی برای کانال مرکب با سیلابدشت‌های مورب با زوایای اریب $5/1$ درجه و $9/2$ درجه نشان می‌دهد که انطباق قابل قبولی بین آنها برقرار است، اما شبیه‌سازی تنش برشی در مقایسه با توزیع سرعت از دقت کمتری برخوردار است.

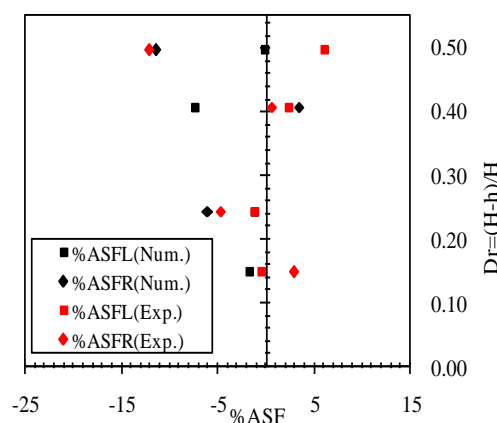
۴. نیروهای برشی ظاهری در فصل مشترک عمودی بین کانال اصلی و سیلابدشت‌ها محاسبه شده‌است. علامت منفی نیروهای برشی ظاهری بیانگر اثر افزایشی جریان کانال اصلی بر روی

۳. با افزایش زاویه اریب سیلابدشت، عموماً قدر مطلق نیروی برشی عمل‌کننده در فصل مشترک افزایش می‌یابد که به مفهوم افزایش اندرکنش جریان بین کانال اصلی و سیلابدشت‌ها است. این پدیده می‌تواند ناشی از افزایش تبادل جرم و به دنبال آن افزایش تبادل اندازه حرکت بین سیلابدشت‌ها و کانال اصلی باشد. نتایج مشابهی در کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلابدشت‌های همگرا به وسیله رضائی و نایت [17] مشاهده شده‌است.

حال می‌توان با استفاده از رابطه زیر، نیروهای برشی ظاهری را به صورت درصدی از نیروی برشی کل مقطع کانال محاسبه و تغییرات آن را برحسب عمق نسبی ترسیم نمود (شکل‌های (۱۲) و (۱۳) را ببینید).

$$\%ASF = \frac{(ASF)}{\rho g A_t L S_0} \times 100 \quad (22)$$

در این رابطه ASF نیروی برشی ظاهری، A_t مساحت مقطع عرضی کل کانال و S_0 شیب کف کانال است.



شکل ۱۲ مقایسه درصد نیروی برشی ظاهری محاسبه شده با استفاده از مدل $k-\epsilon$ و داده‌های آزمایشگاهی در کانال مرکب با سیلابدشت‌های مورب $5/1$ درجه

سرعت جریان در سیلاب دشت‌ها می‌باشد.
 ۵. با افزایش نسبی عمق و نیز زاویه اریب سیلاب-
 دشت‌ها عموماً قدر مطلق نیروی برشی ظاهری در
 فصل مشترک قائم بین کانال اصلی و
 سیلاب دشت‌ها افزایش یافته‌است که به مفهوم
 افزایش اندرکنش بین این قسمت‌ها است.

مراجع

1. Tominaga, A. and Nezu, I., "Turbulent Structure in Compound Open-channel Flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, Pp. 21-41, (199).
2. James, M. and Brown, B. J., "Geometric Parameters that Influence Floodplain Flow", Waterways Experiment Section, Hydraulics Laboratory, Department of Defense, US Army Corps of Engineering, (1977).
3. Elliott, S. C. A., "An Investigation into Skew Channel Flow", PhD Thesis, The University of Bristol, (1990).
4. Elliott, S. C. A. and Sellin, R. H. J., "SERC Flood Channel Facility: Skewed Flow Experiments", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 28, Pp. 197-214, (1990).
5. Sellin, R. H. J., "SERC Flood Channel Facility, Experimental data-Series A, Straight two-stage channels, Skewed floodplain boundaries", The University of Bristol, Vol. 1, (1993).
6. Chlebek, J., "Modelling of Simple Prismatic Channels with Varying Roughness Using the SKM and a Study of Flows in Smooth Non-Prismatic Channels with Skewed Floodplains", PhD Thesis, Birmingham University, (2009).
7. Pezzinga, G., "Velocity Distribution in Compound Channel Flows by Numerical Modeling", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 120, Pp. 1176-1197, (1994).
8. Wu, W., Rodi, W. and Wenka, T., "3D Numerical Modelling of Flow and Sediment Transport in Open Channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 126, Pp. 4-15, (2000).
9. Fischer-Antze, T., Stoesser, T., Bates, P. and Olsen, N. R. B., "3D Numerical Modelling of Open Channel Flow with Submerged Vegetation", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 39, Pp. 303-310, (2001).
10. Rameshwaran, P. and Naden, P. S., "Three Dimensional Numerical Simulation of Compound Channel Flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 129, Pp. 645-652, (2003).
11. Kang, H. and Choi, S. U., "Turbulence Modeling of Compound Open-channel Flows with and without Vegetation on the Floodplain Using the Reynolds Stress Model", *Advances in Water Resources*, Vol. 29, Pp. 1650-1664, (2006).
12. Cokljat, D., "Turbulence Models for Non-circular Ducts and Channels", PhD Thesis, City University of London, (1993).
13. Wright, N. G., Crosseley, A. J., Morvan, H. P. and Stoesser, T., "Detailed Validation of CFD for Flows

- in Straight Channels", *River Flow*, Naples, Italy, (2004).
14. Beaman, F., "Large Eddy sSimulation of Open Channel Flows for Conveyance Estimation", PhD Thesis, Nottingham University, (2010).
15. Rezaei, B. and Amiri, H., "Numerical Modeling of Flow Field in Compound Channels with Non-prismatic Floodplains", *Journal of Scientia Iranica A*, Vol. 25, Pp. 2413-2424, (2018).
16. Celik, I. B., Ghia, U. and Roache, P. J., "Procedure or Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications", *Journal of Fluids Engineering*, ASME, Vol. 130, Pp. 1-4, (2008).
17. Rezaei, B. and Knight, D. W. "Overbank Flow in cCompound Channels with Non-prismatic Floodplains", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.137, Pp. 815-824, (2011).