

تحلیل عددی الگوی جریان ثانویه در کانال روباز با شکل‌های مختلف زبری در کف

نرجس شاهبیدی^۱، بهاره پیرزاده^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران_سازه‌های هیدرولیکی_دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

b_pirzadeh@eng.usb.ac.ir*

تاریخ پذیرش: [۹۸/۴/۱۸]

تاریخ دریافت: [۹۷/۹/۲۸]

چکیده

تخمین سرعت متوسط عمقی و شدت آشفتگی برای شناسایی وجود جریان‌های ثانویه، شکل و موقعیت آن از اهمیت زیادی در علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه برخوردار است. جریان‌های ثانویه تابع عواملی همچون شکل زبری بستر کانال، شیب کانال و تنش برشی است. مطالعه حاضر به بررسی اثر شکل زبری بر الگوی جریان ثانویه با مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار FLOW 3D با مدل آشفتگی RNG پرداخته است. در نتایج بدست آمده از بررسی‌های سرعت متوسط، میانگین خطای حاصل برای حذف‌های زبری‌های مثلی ۹۴٪ و برای روی تاج زبری ۳۷٪ بود و در مورد سرعت برشی، میانگین خطای حاصل برای زبری مثلی در سه مقطع در راستای کانال ۶۳۷٪ به دست آمد که نشان از توافق خوب مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مرجع است. شرایط جریان در کانال برای سه نوع شکل زبری (مسطحی، دوزنقه‌ای با زاویه داخلی ۸۰ درجه و دوزنقه‌ای با زاویه داخلی ۵۵ درجه) که بیشترین کاربرد را در سازه‌های هیدرولیکی دارد طراحی و بررسی شد. نتایج بررسی شدت آشفتگی، جریان‌های ثانویه عرضی و انرژی جنبشی آشفتگی نشان از تاثیر بیشتر زبری دوزنقه‌ای با زاویه داخلی ۵۵ درجه نسبت به دو شکل دیگر زبری را نشان داد. میزان اختلاف شدت آشفتگی در زبری دوزنقه‌ای با زاویه داخلی ۵۵ درجه نسبت به زبری مثلی ۴/۵۴٪ بود. محل تشکیل مرکز هسته سلول‌ها در عمق تقریبی ۰/۲ متر شروع شده بود. انرژی جنبشی آشفتگی با هسته مرکزی در بالای سطح زبری با مقدار تقریبی ۰/۰۰۰۲ برای تمام زبری‌ها شروع شده، اما محل قرار گیری آن با توجه به هندسه زبری متفاوت است.

واژگان کلیدی: جریان‌های ثانویه، شکل زبری، شدت آشفتگی، انرژی جنبشی آشفتگی، FLOW 3D

۱. مقدمه

راستای قائم کانال هستند. در اثر ناهمگنی نوسانات سرعت، یک سری گردابه‌های چرخشی در مقطع کانال ایجاد، که سلول‌های جریان ثانویه نامیده می‌شوند. ناهمگنی آشفتگی به

جریان‌های عبوری از کانال‌ها دارای سه مؤلفه‌ی سرعت، یکی در جهت جریان، یکی در راستای عرضی و دیگری در

مسطح به کمک LDA (Laser Doppler Anemometer) انجام داده و تفاوت بین جریان های ثانویه در کانال های باز و بسته را مشخص نمودند و دریافتند که الگوی جریان های ثانویه در جریان کانال باز بسیار متفاوت از جریان کانال های بسته است که این اختلاف به دلیل حضور سطح آزاد در کانال های باز رخ می دهد [7]. Wang و Cheng ابتدا به طور تجربی ویژگی های سلول های جریان ثانویه را که ناشی از تغییرات زبری بود بررسی کردند و سپس بر اساس داده های تجربی فرمول های تحلیلی برای توصیف پروفیل سرعت و تنش برشی رینولدز که توسط جریان های ثانویه اصلاح می شود را ارائه نمودند [8]. Shah و Tachie در مطالعه آزمایشگاهی به بررسی اثر زبری های مربعی عمود بر جریان بر ساختار جریان های ثانویه شکل گرفته پس از این المان ها پرداختند و با اندازه گیری سرعت برای ارتفاع های مختلف المان های مربعی، ساختار جریان های گردابی را ارزیابی کردند [9]. بهداد و همکاران در مطالعه آزمایشگاهی، با بررسی توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی، موفق به ارائه الگوی سلول های جریان ثانویه در مقطع کانال باز مثالی شدند [2]. مهاجری و صفرزاده به بررسی آزمایشگاهی اثر زبری بستر بر شرایط زیست محیطی رودخانه با استفاده از زبری طبیعی از جنس سنگ دانه های سیلیسی پرداختند و اظهار داشتند که تغییرات و نوسانات، ویژگی های جریان در عرض کانال کاملاً تحت تاثیر حضور سلول های جریان ثانویه هست [10].

علاوه بر این مطالعات تحلیلی و عددی بسیاری نیز برای شبیه سازی جریان های ثانویه روی بستر زبر صورت گرفته است. در راستای بررسی تحلیلی سلول های جریان ثانویه، شینو و نایت (SKM) روشی برای محاسبه توزیع جانبی سرعت و تنش برشی در کانال منشوری بر اساس مدل سازی سلول های جریان ثانویه ابداع نمودند [11]. Yang و Lim یک روش تحلیلی یانگ و لیم (YLM) را برای محاسبه توزیع تنش برشی در کانال های منشوری با یک زبری مرزی غیریکنواخت توسعه دادند. این روش بر پایه مفهوم انتقال انرژی مازاد از طریق یک فاصله نسبی کم به سمت نزدیک ترین مرز، در حالت جریان آشفته ی پایدار، غیریکنواخت و

علت شرایط مرزی بستر، دیواره های جانبی و سطح آزاد، نسبت ابعادی کانال، هندسه کانال و زبری بستر به وجود می آید [1]. الگوهای جریان ثانویه در کانال های باز به دلیل وجود سطح آزاد سیال با کانال ها و مجاری بسته متفاوت است. وجود جریان های ثانویه، شکل و موقعیت آن در شناخت مسائل مختلفی در علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه حائز اهمیت است [2]. اندازه گیری مستقیم جریان ثانویه به راحتی امکان پذیر نیست. این جریان ها که مقدار آن ها در حدود ۲ تا ۳ درصد سرعت متوسط جریان است حاصل غیر همگن بودن آشفتگی سیال است [3]. المان های زبر به طور طبیعی (تخریب ناشی از پدیده کاویتاسیون، آبستنگی و ته نشینی رسوبات) و مصنوعی به صورت های مختلف (هوادهی در سرریزها) در سازه های هیدرولیکی و آرایش آنها از عوامل مهمی در تعیین الگوی جریان ثانویه است [4]. مطالعات عددی و آزمایشگاهی بسیاری برای فهم بهتر الگوی جریان پیرامون المان های زبر صورت گرفته است. Cui و همکاران در حضور قطاری از المان های زبر بستر، زبری ایجاد شده را به دو نوع $K (P/K > 1)$ و $d (P/K < 1)$ طبقه بندی کرده که منجر به تولید سه نوع رژیم جریان زبر می شود (پارامترهای P و K بترتیب فاصله مرکز به مرکز بین دو المان متوالی و ارتفاع المان). طبق نتایج این پژوهشگران که در شکل (۱) نشان داده شده، در زبری نوع d ، گردابه های جدا شده حد فاصل بین المان های زبر را پر می کنند. در زبری نوع K ، جدایی و بازگشت جریان در فاصله بین هر دو المان متوالی ایجاد شده که منجر به اندرکنش قوی بین لایه زبری و جریان خارجی می شود. در رژیم جریان بین این دو حالت، ناحیه جدایی با بعدی برابر فاصله بین دو المان شکل گرفته که از بازگشت جریان خارجی به کف بین دو المان جلوگیری می کند [5, 6]. Tominaga و همکاران به بررسی آزمایشگاهی سلول های جریان ثانویه در کانال های صاف با مقطع مستطیلی روباز و Tominaga و Ezaki کانال با مقطع دوزنقه ای را بررسی کرده و آثار سطح آزاد، شکل و نسبت جناحی کانال و همچنین آثار شیب جداره کانال را روی ساختار جریان ثانویه و ساختار سه بعدی آشفتگی تحقیق کرده و الگوی این جریان ها را ارائه نمودند [7]. Nezu و Rodi تعدادی آزمایش روی جریان ثانویه در کانال های باز

کانال را ارزیابی کردند [1]. شامل و پیرزاده با استفاده از شبیه‌سازی جریان پیرامون المان‌های زبر، به کمک یک کد عددی سه بعدی و با بکارگیری تکنیک گردابه‌های بزرگ (LES)، توانستند به ارزیابی آثار چیدمان المان‌ها و نسبت استغراق جریان بر ویژگی‌های جریان میانگین و نوسانی، سرعت برشی، شدت آشفتگی و تنش برشی رینولدز در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی مرجع بپردازند [15]. Stoesser و همکاران به بررسی جریان‌های ثانویه و آشفتگی روی یک زبری غیریکنواخت در بستر کانال باز پرداختند که نتیجه، توافق خوب بین داده‌های تجربی و LES بود [16]. نظری، علی‌آبادی و همکاران به بررسی اثر زبری‌های مصنوعی حوضچه آرامش با مدل‌سازی در نرم‌افزار Flow-3D پرداختند و دریافتند که ایجاد زبری مستطیلی باعث کاهش عمق ثانویه حوضچه واگرای زبر به اندازه ۶۳/۲۴ درصد و کاهش طول پرش هیدرولیکی به اندازه ۶۴/۱۷ درصد می‌شود که این زبری عامل اقتصادی شدن حوضچه آرامش می‌شود [17]. Talepour و liu به بررسی جریان ثانویه نوع دوم از طریق مدل جدید مبتنی بر معادلات میانگین‌گیری ناوراستوکس (RANS) پرداختند. ابتدا در شبیه‌سازی جریان ثانویه از کانال مستطیلی با دیواره‌های صاف استفاده نمودند تا داده‌های شبیه‌سازی مانند پروفیل سرعت، تنش برشی و بردارهای جریان ثانویه با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شود و بعد در مرزهای زبر ارزیابی شد. مقایسه نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار OPENFOAM با داده‌های آزمایشگاهی، دقت خوبی را نشان داد [18].

با توجه به اثر شکل زبری روی ساختار الگوی جریان ثانویه، لزوم پژوهش بیشتر روی تغییر شکل زبری‌ها که در راستای جریان واقع شده‌اند ضروری است. هدف از این مطالعه بررسی پارامترهای آشفتگی در اطراف زبری‌ها با هندسه متفاوت، که کاربرد زیادی در سازه‌های هیدرولیکی دارند، با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار Flow-3D است.

۲. مواد و روش‌ها

نرم‌افزار Flow-3D یک مدل مناسب برای حل مسائل پیچیده دینامیک سیالات بوده که می‌تواند دامنه وسیعی از جریان

کاملاً توسعه یافته قرار دارد که جریان‌های ثانویه را در محاسبات وارد می‌کند [12].

Huser و Biringen با شبیه‌سازی عددی مستقیم، الگوی جریان ثانویه را در مجرای مربعی بررسی نمودند [13]. Chio و همکاران به کمک مدل تنش رینولدز، به بررسی اثر زبری-های نواری بستر بر روی سرعت متوسط و ساختارهای جریان در مقطع عرضی کانال پرداخته و توانستند انتقال رسوب را به خوبی مدل‌سازی نمایند [14].

شکل ۱. رژیم‌های جریان عبوری از المانهای زبر متوالی؛ a: نوع d, b: حد بینابین، c: نوع k [6]

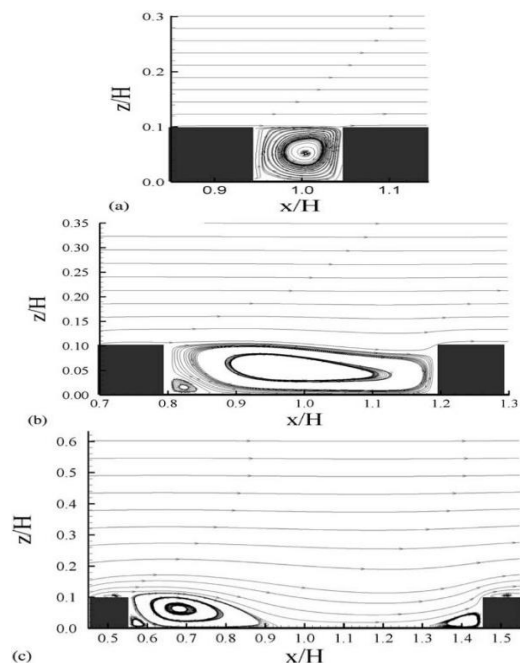


Fig. 1. Flow current regimes from successive rough elements, a) type d, b) Intermediate limit, c) type k [6]

ذبیحی و همکاران به بررسی عددی مشخصات سلول‌های جریان ثانویه، توزیع تنش برشی و سرعت عمقی در کانال باز مثلی با مدل‌سازی عددی پرداخته و دریافتند که افزایش زبری جداره به صورت یکنواخت، موجب کوچک شدن سلول گوشه و نزدیک سطح آب و بزرگتر شدن سلول پایینی شده که به سمت آب متمایل می‌شود [3]. تاج نسایی و همکاران با کمک نرم‌افزار ANSYS-CFX به مدل‌سازی سلول‌های جریان ثانویه در کانال دوزنقه‌ای پرداخته و سلول‌های جریان ثانویه، توزیع سرعت عمق میانگین و تنش برشی مرزی در

که در این رابطه A متوسط نسبت مساحت جریان در جهت-های (x,y,z) ، (u,v,w) متوسط سرعت در جهت های (x,y,z) و F تابع نسبت سیال که مقادیری بین $(0, 1)$ دارد.

۳. مشخصات مدل آزمایشگاهی مرجع

این پژوهش با توجه به اطلاعات مدل آزمایشگاهی Negara که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه ملی سنگاپور انجام گرفته است، پایه گذاری شد. Negara برای بررسی آثار بستر زبر بر جریان، آزمایش هایی را روی زاویه های مختلف قرارگیری المان های زبر ساختاریافته انجام داد. وی المان های شیشه ای با مقطع مثلثی به طول $3/5$ متر و به ارتفاع $1/5$ سانتی متر را با فاصله محور تا محور 10 سانتی متر در کانال افقی به طول 12 و عرض $0/6$ متر را در راستای جریان مطابق شکل (۲) استفاده نمود [20]. نسبت فاصله المان ها به ارتفاع آنان یعنی w/k برابر $6/7$ بوده (زبری نوع k) و نسبت عرض به عمق نیز $1/5$ است. ویژگی های هندسی و هیدرولیکی این آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است.

شکل ۲. محل قرارگیری المان های زبر مثلثی مدل آزمایشگاهی [20]

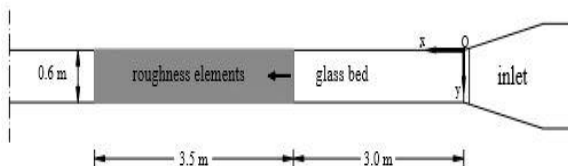


Fig. 2. The location of the triangular rough elements of the laboratory model [20]

جدول ۱. ویژگی های هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی مرجع [20]

Depth of flow (m)	Q (lit/s)	Channel width (m)	Height of triangular elements (m)	Distance to the axis of the axis elements (m)
0.4	32	0.6	0.015	0.1

Table.1. Geometric and Hydraulic Properties of Reference Laboratory [20]

سیالات را مدل کند. در این نرم افزار از دو تکنیک عددی برای شبیه سازی هندسی استفاده می شود [19]:

(۱) روش حجم سیال (VOF): این روش برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد استفاده می شود.

(۲) روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR): کاربرد این روش برای شبیه سازی سطوح و اجسام صلب، مثل مرزهای هندسی است.

معادلات حاکم بر جریان سیال عبارتند از [19]:

الف) معادله پیوستگی جرم که به صورت معادله (۱) است:

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

که V_F کسر حجمی جریان، ρ دانسیته سیال، R_{DIF} عبارت پخش آشفته گی و R_{SOR} منبع جرم هستند. اجزاء سرعت (u,v,w) در جهات (x,y,z) یا (r,θ,z) هستند. A_x ، A_y و A_z برابر کسرهای سطحی برای جریان در جهت های x ، y و z است و مقدار ضریب R بستگی به نوع سیستم مختصات دارد.

ب) معادله مومنتوم نیز به شرح معادله (۲) است [19]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned} \quad (2)$$

که از آنها به معادلات ناویراستوکس یاد میشود که در این معادلات (G_x, G_y, G_z) ترم های شتاب جرم، (f_x, f_y, f_z) ترم های ویسکوز است.

ج) معادله پروفیل سطح آزاد نیز به شرح معادله ۳ است [19]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) \right\} = 0 \quad (3)$$

۴. روش عددی مورد استفاده

ابتدا این مطالعه در بخش درستی آزمایی، هیدرولیک جریان اطراف المان‌های زیر مثلی شکل و سپس اثر شکل مقطع المان زبری بررسی شد.

۴-۱. شبیه‌سازی هندسه کانال

هندسه کانال شبیه‌سازی شده در شکل (۳) نمایش داده شده است. شرایط مرزی انتخاب شده به شرح جدول (۲) است. برای انتخاب مدل آشفتگی نیز با توجه به نتایج درستی آزمایی و اینکه مدل RNG می‌تواند جزئیات کوچک جریان و جریان‌هایی که دارای مناطق برشی زیاد هستند را با دقت بیشتر توصیف کند [19] مدل آشفتگی RNG انتخاب شد.

شکل ۳. هندسه مدل عددی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Flow-3D

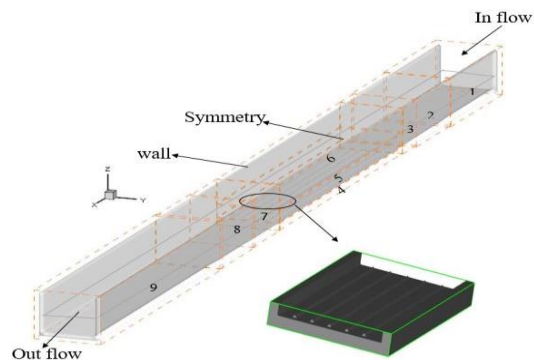


Fig. 3. Geometry of simulated model in Flow-3D software

جدول ۲. شرایط مرزی مدل عددی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Flow-3D

Free surface	Floor and wall of the channel	Channel output	Channel input
Symmetry	wall	Specified pressure H=0.4 (m)	Volume flow rate Q=32 (lit/s)

Table.2. Boundary condition of simulated model in Flow-3D software

۴-۲. انتخاب شبکه محاسباتی بهینه

یکی از مسائل در حل عددی معادلات با مشتقات جزئی، ایجاد شبکه‌بندی مناسب است. با ایجاد یک شبکه‌بندی

مناسب می‌توان حل سیستم معادلات دیفرانسیل را تا حد زیادی ساده کرد [21]. برای این منظور چهار مدل با شبکه‌بندی متفاوت که مربوط به بلوک‌های وسط کانال که منطقه زبری را شامل می‌شود در نظر گرفته شد که مشخصات آن در جدول (۳) آورده شده است. تغییرات سرعت میانگین در عمق کانال مطابق با داده‌های آزمایشگاهی مرجع، با بستر زبر مثلی برای شبکه‌های محاسباتی مختلف ارزیابی شد که حالت سوم با توجه به خطای بدست آمده و زمان مناسب‌تر در انجام محاسبات انتخاب شد.

جدول ۳. درصد خطای حاصل از شبکه‌بندی متفاوت برای سرعت میانگین عمقی

RMSE %	Mesh size for the block 6 (mm)	Mesh size for the block 5 (mm)	Mesh size for the block 4 (mm)	Mesh No
9.58	20	10	7	Mesh 1
6.84	15	9	6	Mesh 2
3.71	10	7	5	Mesh 3
2.56	9	6	4	Mesh 4

Tabel.3. Error percent of different meshing for deep average velocity

۴-۳. درستی آزمایی نتایج

دقت شبیه‌سازی انجام شده در ابتدا با مقایسه مقادیر سرعت متوسط برای دو حالت یکی در روی تاج المان و دیگری حد فاصل بین المان‌ها با داده‌های آزمایشگاهی مرجع صورت گرفت که در شکل (۴) نشان داده شده است. با مقایسه نتایج درستی آزمایی انجام شده، درصد خطای میانگین در نمونه شبیه‌سازی شده در جدول (۴) ذکر شده است.

در مدل آزمایشگاهی مرجع علاوه بر سرعت‌های متوسط در راستای جریان، سرعت برشی نیز با معلوم بودن سرعت جریان آزاد (u_{∞}) در فاصله مورد نظر با استفاده از روابط (۴) تا (۷) محاسبه شده است [20]. مقایسه نتایج حاصل در جدول (۵) ارائه شده است. درصد خطای کم نتایج در این بخش نیز، هماهنگی خوب مدل عددی با آزمایشگاهی مرجع را نشان می‌دهد.

جدول ۴. میزان درصد خطای سرعت متوسط راستای جریان در مطالعه حاضر با مدل آزمایشگاهی مرجع

Average error percentage (%)	Comparison of average flow velocity
3.71	On roughness
9.94	The distance between roughness

Table.4. The mean error of the mean flow velocity in the present study with the referred experimental model

جدول ۵. مقایسه سرعت برشی با توجه به محاسبات آزمایشگاهی مرجع

Average error percentage (%)	$(u_x)_{num}$ (cm / s)	$(u_\infty)_{num}$ (cm / s)	$(u_\infty)_{num}$ (cm / s)	$(u_\infty)_{exp}$ (cm / s)	Location (m)
		[20]		[20]	
6.58	1.065	1.14	13.02	13.33	x=4
6.86	0.95	1.02	13.02	13.33	x=5
5.67	0.915	0.97	13.02	13.33	x=6

Tabel.5. Comparison of shear velocity according to referred laboratory calculate

۴-۴. بررسی اثر شکل زبری

در این پژوهش، به منظور بررسی اثر شکل زبری، المان‌هایی با هندسه‌های نشان داده شده در شکل (۳)، طراحی شده است. با حفظ ارتفاع ۰/۱۵ متر و فاصله محور تا محور زبری‌ها به اندازه ۰/۱ متر، شکل مقطع این المان‌ها تغییر کرده است.

شکل ۵. مشخصات المان‌های زیر مورد بررسی برحسب (متر)

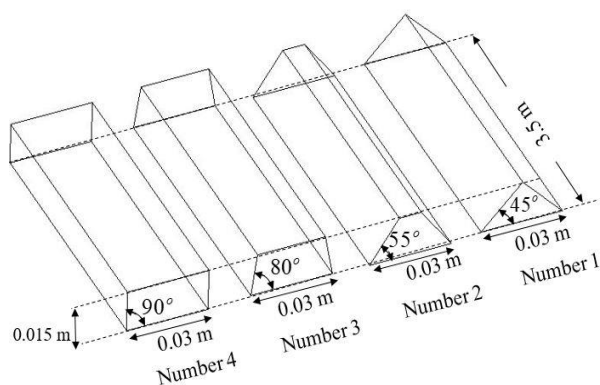


Fig. 5. Specifications of rough element examined in (m)

$$R_\infty = \frac{u_\infty x}{\nu} \quad (4)$$

$$c'_f = (2 \log R_\infty - 0.65)^{-2.3} \quad (5)$$

$$\tau_0 = \frac{1}{2} c'_f \rho u_\infty^2 \quad (6)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (7)$$

که R_∞ عدد رینولدز، x فاصله طولی مورد نظر از ورودی کانال، ν ویسکوزیته دینامیکی با مقدار $8.01 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$ ، c'_f ضریب اصطکاک سطحی، τ_0 تنش برشی u_* سرعت برشی است [20].

شکل ۴. مقایسه سرعت متوسط راستای جریان برای الف) حد فاصل بین زبری‌های مثلثی، ب) روی تاج زبری مثلثی در مقطع $x=5 \text{ m}$ از ورودی کانال

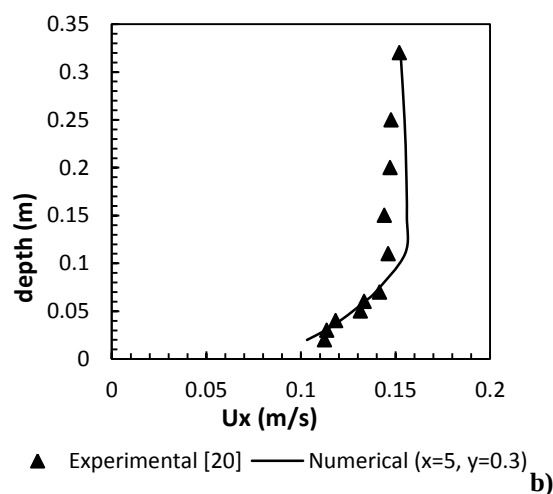
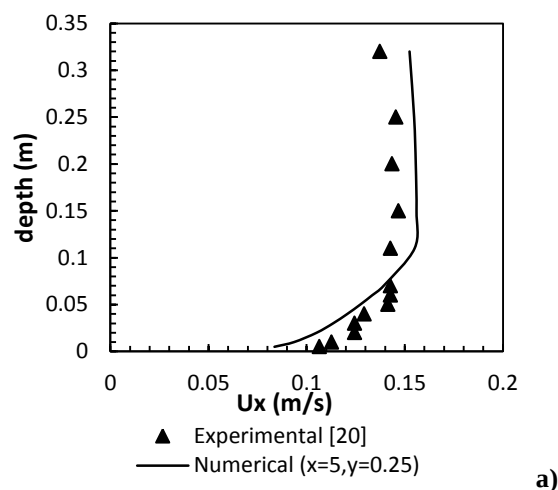


Fig. 4. Comparison of flow velocity for, a) The boundary between triangular roughnesses, b) On triangular roughness at the cross section $x=5 \text{ m}$ of the channel input

۵. نتایج و بحث

با توجه به بخش درستی‌آزمایی و هماهنگی خوب نتایج عددی با آزمایشگاهی به بررسی پارامترهای آشفتگی برای اشکال هندسی طراحی شده زبری و مقایسه آن با زبری مثلی حاصل از مدل آزمایشگاهی مرجع پرداخته می‌شود تا اثر شکل‌گیری جریان‌های ثانویه با تغییر در شکل زبری ارزیابی شود.

۵-۱. شدت آشفتگی

در مقادیر شدت آشفتگی می‌توان رفتار مقیاس‌های کوچک جریان را مشاهده نمود. مقادیر شدت آشفتگی در جریان فاصله $x=5m$ از ورودی کانال برای دو حالت روی تاج زبری و حد فاصل بین زبری‌ها برای سه نوع هندسه زبری مطابق شکل (۳) مورد ارزیابی قرار گرفته که در شکل‌های (۶ و ۷) نشان داده شده است. مقدار شدت آشفتگی روی تاج المان زبر در ابتدا افزایش یافته تا به مقدار بیشینه خود برسد و بعد از آن تا سطح آب روند کاهشی داشته تا به یک مقدار ثابت برسد مقدار ماکزیمم که در لایه‌های پایینی نزدیک به زبری اتفاق می‌افتد ناشی از شکل‌گیری لایه برشی است و بواسطه همین شکل‌گیری لایه برشی است که جدایی جریان از روی المان صورت می‌پذیرد [25]. با توجه به شکل (۶) در روی المان زبر، شدت آشفتگی در جهت جریان، به دلیل متاثر بودن از شکل زبری، تغییر ناگهانی داشته اما در نمودارهای رسم شده برای حد فاصل بین زبری‌ها به دلیل فاصله زیاد زبری‌ها (زبری نوع k) تغییر شدت آشفتگی با تغییر شکل زبری بسیار اندک است. طبق نتایج سایر محققین [22] بخش شار مومنتوم در نزدیک تاج المان زبر غالب است و به دلیل حضور نواحی چرخشی و بازگشت جریان در پیرامون المان زبر میدان جریان نوسانات زیادی را نسبت به میدان میانگین تجربه کرده و شدت آشفتگی روی تاج زبری افزایش یافته است.

میزان اختلاف حاصل از تغییر هندسه زبری نسبت به زبری مثلی برای دو حالت روی تاج زبری و بین المان‌های زبر برای عمق نزدیک بستر که محدوده زبری را شامل می‌شود به شرح جدول (۶) است که نشان دهنده تاثیرگذاری زبری

دوزنقه‌ای با زاویه داخلی ۵۵ درجه با درصد خطای ۴/۵٪ است.

شکل (۷) کانتورهای تشکیل شده تحت تاثیر شدت آشفتگی را در ناحیه روی سطح زبری و در میانه کانال نشان می‌دهد. اندازه و موقعیت کانتورها با توجه به تغییر شکل زبری تغییر یافته است که نشان از میزان تاثیرگذاری شکل هندسه زبری بر جریان هست. تاج‌نمایی [1] نیز در مطالعه خود حضور زبری و تغییر در ابعاد سلول‌ها و موقعیت آنها نسبت به سطح آب را بیان نموده است.

شکل ۶. مقایسه میزان شدت آشفتگی زبری مثلی با سایر زبری‌ها برای حالت الف) حد فاصل بین زبری، ب) روی زبری برای مقطع $x=5m$ از ورودی کانال

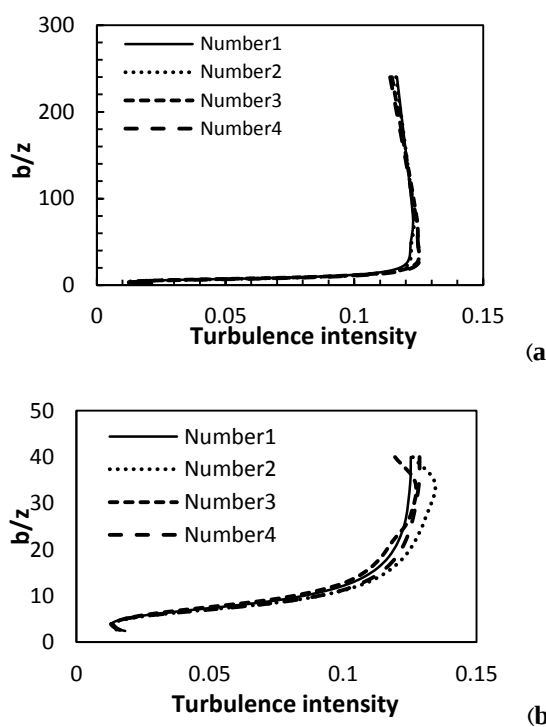


Fig. 6. Comparison of the turbulence intensity of triangular roughness with other roughness shapes, a) The distance between roughnesses, b) On roughness for section $x=5$ (m) from the channel input

با توجه به شکل (۷) اندازه کانتورها و مقدار آن با اندازه بیشینه ۲۰ درصد نشان داده شده‌است که برای زبری مستطیلی وسعت کانتورها با بیشترین مقدار در نزدیکی سطح زبری را شامل شده‌است.

جدول ۶. مقایسه میزان میانگین اختلاف حاصل از شدت آشفتگی زبری مثلثی (Number1) با سایر زبری‌ها (%)

On roughness	The distance between roughness	Roughness type
4.54	0.28	Number2
2.65	1.72	Number3
2.57	1.86	Number4

Tabel.6. Comparison of the mean difference of the triangular roughness with other roughness

۲-۵. جریان‌های ثانویه عرضی

یکی از سازوکارهای تشکیل جریان‌های چرخشی در راستای طولی مرتبط با غیر هموژنیته (Non-homogeneity) و غیر ایزوتروپی (Anisotropy) بودن آشفتگی است. به دلیل عدم توازن جانبی تنش‌های آشفتگی، رتیسیتی‌های راستای طولی شکل می‌گیرند. این رتیسیتی‌ها در جهات عرضی کشیده و با هم آمیخته می‌شوند که منجر به تشکیل جریان‌های ثانویه بزرگ می‌شوند. جریان‌های ثانویه شکل گرفته در این حالت، نوع دوم جریان‌های ثانویه پراتل (Prandtl's second kind of secondary flow) نامیده می‌شوند [23]. شناخت جریان‌های ثانویه در علم هیدرولیک از بسیاری از جهات و به ویژه اثر آنها بر انتقال رسوب و بنابراین تغییر فرم بستر مهم است. پس در این بخش خطوط جریان عرضی حاصل از زبری‌ها در شکل (۸) نشان داده شده‌است. جریان‌های ثانویه در واقع حرکت سرعت‌های عرضی در مقطع کانال است [24]. حضور المان‌های زبر در بستر، باعث تغییر در شکل سرعت عرضی و ایجاد سلول‌های ثانویه با اشکال متفاوت می‌شوند که متناسب با نوع تغییر در شکل زبری است. ساختار اصلی سلول‌ها با تغییر هندسه زبری تغییر نکرده، اما اندازه سلول‌ها و تمایل به دیواره چپ و راست با توجه به تغییر در شکل هندسه زبری تغییر یافته‌است، چنانچه Tominaga و همکاران [7]، در نتایج آزمایشگاهی خود در کانال مستطیلی بیان نمودند.

شکل ۷. نمایش کانتورهای تشکیل شده اثر شدت آشفتگی در فاصله $x=5$ (m) از ورودی کانال برای شکل زبری‌های مختلف

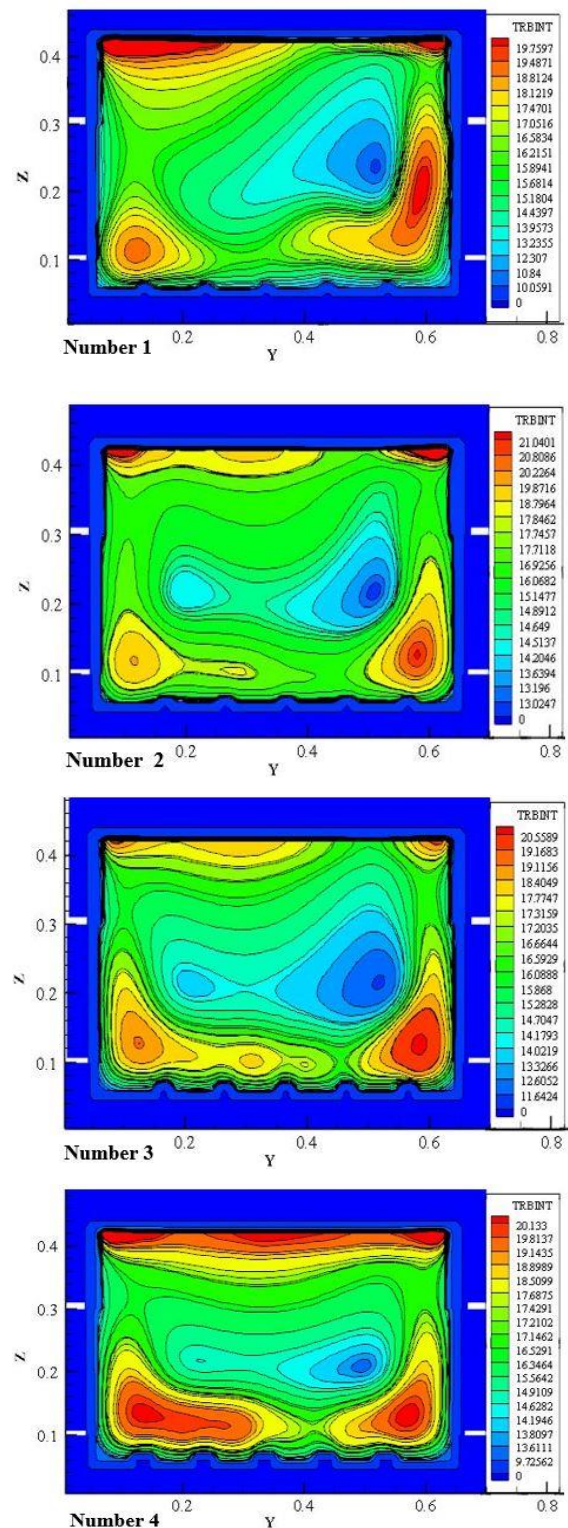


Fig. 7. Displays the contours formed by the effect of the turbulence intensity at a distance of $x=5$ (m) from the channel entrance for different roughness forms

عرض به عمق کمتر از ۵ ($B/H < 5$) هست با بستر ثابت ابتدا گرداب‌ها به دلیل وجود دیواره‌های جانبی در گوشه شروع و سپس در جهت جانبی بسط داده می‌شوند [8] که با توجه به اندازه‌های کانال مورد نظر مقدار $B/H=1.5$ که کمتر از ۵ است، وجود گرداب‌ها در وسط کانال را توجیه می‌کند. از طرفی تمایل سلول‌ها به دیواره چپ یا راست، متأثر از شکل زبری می‌تواند باشد که در زبری ذوزنقه‌ای با زاویه داخلی ۵۵ درجه تمایل سلول‌ها به هر دو سمت دیواره می‌باشد. چنانچه که پژوهشگران دیگر بیان نموده‌اند [5, 16]. مطابق با شکل (۸)، الگوی جهت چرخشی جریان ثانویه با تغییر زبری، تغییر نمیکند همان‌طور که در نتایج بهداد و همکاران نیز نشان داده شده‌است [2].

۳-۵. انرژی جنبشی آشفتگی

انرژی جنبشی آشفتگی (TKE) میانگین انرژی در واحد جرم است که در جریان متلاطم رخ می‌دهد که به صورت معادله (۸) بیان می‌شود [25].

$$K = \frac{1}{2} (\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2}) \quad (8)$$

که u' ، v' و w' مولفه‌های نوسانی سرعت به ترتیب در راستای x ، y و z هستند [25].

سازوکار جریان‌های ثانویه با در نظر گرفتن ساختار آشفتگی، وجود چرخش‌ها در اثر توزیع مجدد انرژی از جایی که v سرعت عمودی و w سرعت عرضی است به وسیله تانسورهای همبستگی سرعت در نزدیکی المان زبر را بیان می‌کند که متأثر از شکل زبری متغیر است همان‌طور که Cui و همکاران نیز بیان نمودند [6]. در شکل (۹) انرژی جنبشی آشفتگی در مقطع $x=5$ m از ورودی کانال برای المان‌های زبر نشان داده شده‌است. با توجه به شکل (۹) گردابه‌های بزرگ در عمقی بالاتر از سطح زبری واقع شده و برای تمام المان‌های زبر مختلف مقدار هسته مرکزی با مقدار تقریبی 0.002 شروع می‌شود. اما محل قرار گیری آن با توجه به شکل زبری متفاوت است [6, 18].

شکل ۸. جریان‌های ثانویه شکل گرفته در مقطع عرضی در مقطع $x=5$ m از ورودی کانال برای المان‌های زبر مختلف

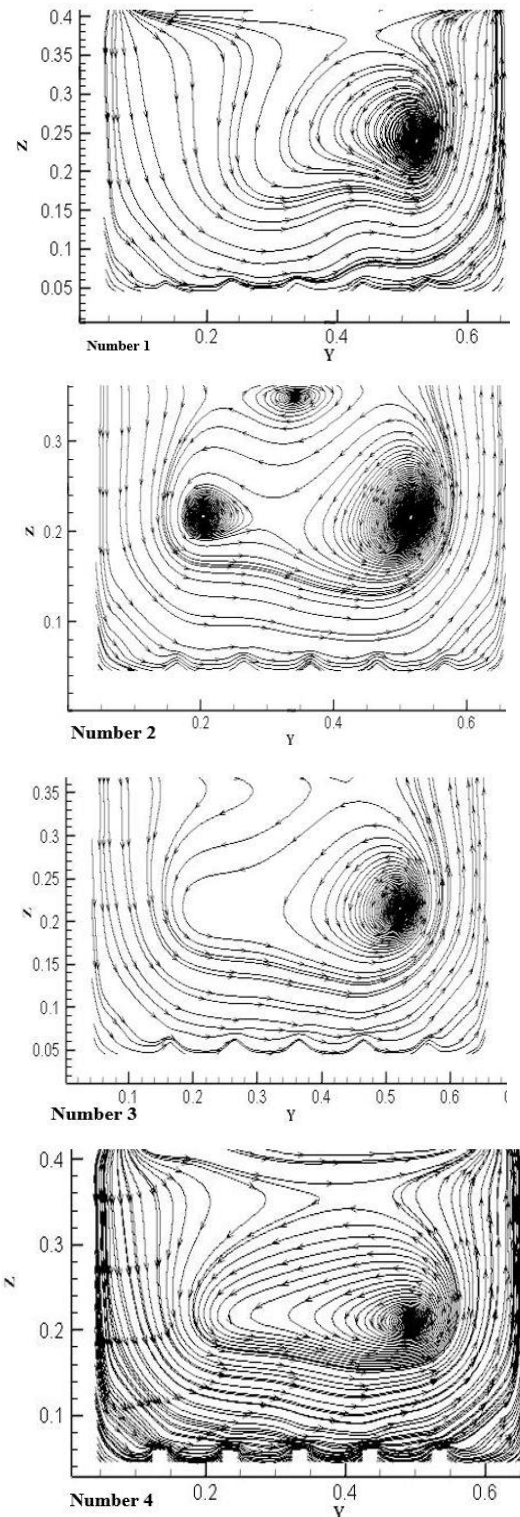


Fig. 8. Secondary currents formed at the cross section at a distance of $x=5$ (m) from the channel entrance for different roughness forms

با توجه به شکل (۸) محل تشکیل مرکز هسته سلول‌ها در عمقی تقریباً از 0.2 متر است. در کانال‌های باریک که نسبت

شکل ۹. انرژی جنبشی آشفتگی در مقطع عرضی $x=5\text{ m}$ از ورودی کانال برای المان های زبر

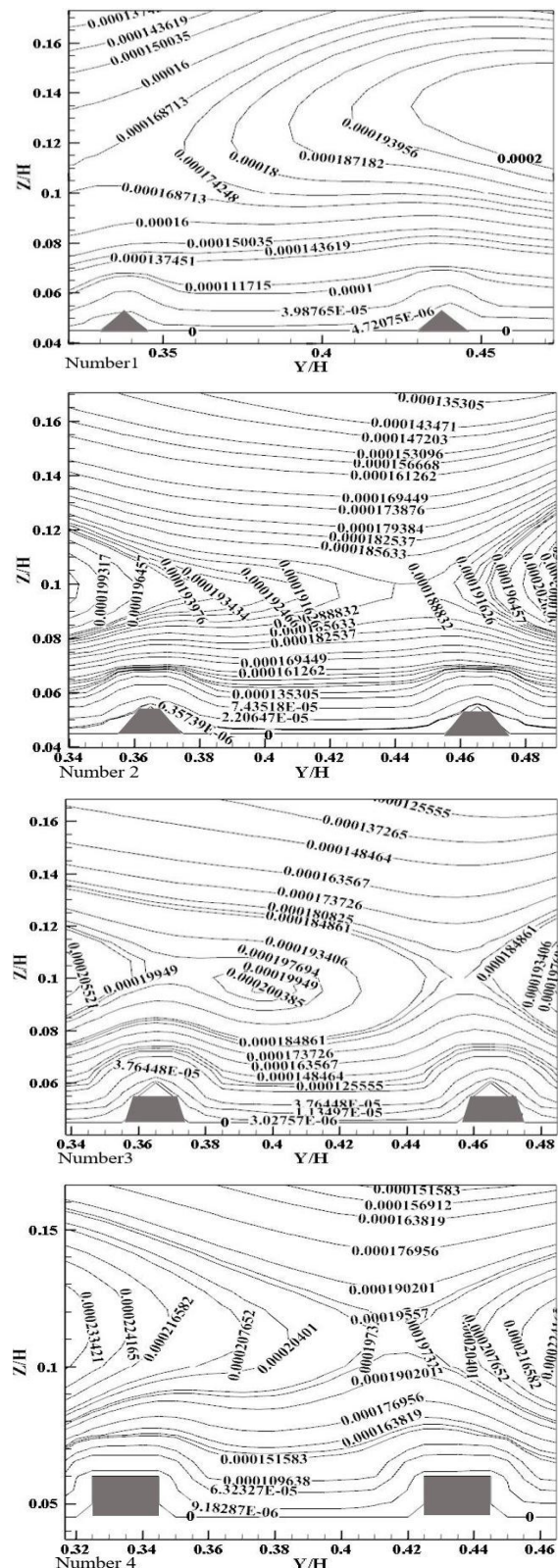


Fig. 9. Turbulent kinetic energy in cross section $x=5\text{ m}$ from channel input for rough elements

در واقع انرژی جنبشی آشفتگی اثر مولفه نوسانی سرعت $\overline{v'}$ و $\overline{w'}$ است چنانچه که Huser و Biringen وجود چرخش-های بیرونی را در اثر توزیع مجدد انرژی دانسته و به وسیله تانسور سرعت، ظاهر شدن سلول ها را در سطح زبری بیان نمودند [13]. انرژی جنبشی آشفتگی در ارتفاعی نزدیک به زبر بیشترین مقدار خود را دارد زیرا در قسمت تاج زبری گردایان سرعت میانگین در راستای جریان سهم بسزایی در تولید انرژی آشفتگی دارد که منجر به افزایش میزان انرژی جنبشی آشفتگی در تاج زبری می شود همان طور که پژوهشگران دیگر از جمله شاملو و پیرزاده [5] و Talepour و liu [18] نیز بیان نمودند.

۶. نتیجه گیری

نتیجه عملکرد مدل سازی سلول های جریان ثانویه و پارامترهای جریان نشان از توانایی نرم افزار در مدل سازی جریان های ثانویه است. از طرفی پارامترهای آشفتگی به شکل هندسی حساس هست. میزان اختلاف شدت آشفتگی سایر زبری ها با زبری مثلی در عمق 0.1 m متر از کف کانال برای زبری دوزنقه ای با زاویه داخلی 55° در حدود $4/54\%$ است که متاثر از شیب تند در اضلاع زبری است. از طرفی محل تشکیل مرکز هسته سلول ها در عمقی تقریباً 0.2 m متر شروع می شود. اندازه های کانال $B/H=1.5$ که کمتر از 5 است، وجود گرداب ها در وسط کانال را توجیه می کند. انرژی جنبشی آشفتگی با هسته مرکزی در بالای سطح زبری با مقدار تقریبی 0.002 شروع و محل قرار گیری آن با توجه به شکل زبری متفاوت است.

References

۷. مراجع

- 1) Tajnesaie. M., Azhdary Moghadam. M., Givehchi. M., 1392. "Application of computational Fluid Dynamics in Modeling of secondary flow cells in Trapezoidal channel". Ferdowsi Civil Engineering Journal, Year 25, No 1. (In Persian)
- 2) Behdad. A., Maghrebi. M. F., Givehchi. M., 1389. "Changes in the distribution of average depth velocity and shear stress in a triangular open channel, 5th National congress on Civil Engineering, Mashhad Ferdowsi University, Iran. (In Persian)

- 14) Choi. S., Park. M., Kang. H. 2007. Numerical simulations of cellular secondary currents and suspended sediment in open-channel flow over smooth-rough bed strip, *Journal Hydraulic Research*, Vol 45 (6), pp 829-840.
- 15) Shamloo. H., Pirzadeh. B., 1392. "Validation of numerical code limited volume in the estimate square turbulent flow on a rough bed by using Large Vortex Technique". 7th National Civil Engineering Congress, Iran. (In Persian)
- 16) Stoesser. T., Mcsherry. R., Fraga. B. 2015. Secondary currents and turbulence over a Non-Uniformly Roughened open-channel Bed, *water* 2015, No 7, pp4896-4913; doi:10.3390/w7094896.
- 17) Nazari Ali Abady. KH., Akhtari. A. A., Gord Noshahri. A., 1396. "Effect Rectangular Strip Roughness on Hydraulic Jump Characteristic in Diverging Rectangular Section with FLOW-3D Software". *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J.)*. Vol 17, No 4. (In Persian)
- 18) Talebpour. M., Liu. X., 2018. Numerical investigation on the suitability of a fourth-order nonlinear k- ω model for secondary current of second type in open-channels, *Journal of Hydraulic Research*, DOI: 10.1080/00221686.2018.1444676.
- 19) Ghasemzadeh. F., 1392. "Simulation of Hydraulic issues in Flow-3D". First Edition, Noavar Publishing. (In Persian)
- 20) Negara, A. S. 2009. Experimental study of turbulent current over fixed 2D and 3D bottom roughness, National University of Singapore, Master thesis.
- 21) Versteeg. H. K., Malalasekera. W., 1386. "An Introduction to Computational Fluid Dynamics". Translator: shojaee Far. M .H., Norpour Hoshtroodi. A. R., Second edition, Science and Technology University press, Tehran. (In Persian)
- 22) Sing, K. M. Sandham, N. D., Williams, J. J. R. 2007. Numerical simulation of flow over a rough bed, *J. Hydraulic Eng*; Vol. 133; No. 4; pp.386-398.
- 23) Prandtl L. 1953. *Essentials of fluid dynamics*, New York, US: Hafner Publishing Company.
- 24) Prof. Thandaveswara. B.S., 2014. *Hydraulics*, Indian Institute of Technology Madras, pp1-13.
- 25) Schlichting, H., 1979. *Boundary-Layer Theory*, seventh ed. Series in Mechanical Engineering, McGraw-Hill, New York
- 3) Akbari. GH. H., Givhechi. M., Zabihi. H., 1390. "Numerical study of the characteristics of Secondary flow cells, shear stress distribution and average depth velocity in the triangular open channel". 6th National Congress on Civil Engineering, Semnan, Iran. (In Persian)
- 4) Falvey, H. T. 1990. *Cavitation in Chutes and Spillways*, A Water Resources Technical Publication Engineering Monograph, No. 42.
- 5) Shamloo. H., Pirzadeh. B., 1392. "Simulation of flow vortex in open channel with three different roughness types". 12th Hydraulic Conference, Department of Irrigation & Rehabilitation Campus of Agriculture and Natural Resources. (In Persian)
- 6) Cui. J., Patel. V. C., Lin. C. L., 2003. Large-eddy Simulation of turbulent flow in a channel with rib roughness. IIHR—Hydrosience and Engineering and Department of Mechanical Engineering, The University of Iowa, Iowa City, IA 52242-1585, USA.
- 7) Tominaga. A., Nezu, I., Ezaki., Nakagawa. H. 1989. Three-dimensional turbulent structure in straight open channel, *Journal of Hydraulic Research*, VOL27, No.1, pp149-173.
- 8) Wang, Z. Q., Cheng, N. S., 2005. Secondary flows over artificial bed strips, *Advances in Water Resources*. No 28(5), pp 441-450.
- 9) Shaha, M., Tachie, M., 2009. PIV investigation of flow over a transverse square rib in pressure gradients, *Journal of Turbulence* Vol. 10, No. 39, pp1-22.
- 10) Mohajeri. S. H., Safarzadeh. A., 1391. "Laboratory Study of the effect of bed roughness on river environmental Condition". 9th International Civil Engineering Congress, Isfahan University of Technology, Iran. (In Persian)
- 11) Knight. D.W., Omran. M., Tang. X., 2007. Modelling Depth-Averaged Velocity and Boundary shear in Trapezoidal Channels with secondary Flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 133, No. 1, ASCE, pp. 39-47.
- 12) Khodashenas. S.R., Abderrezzak. K.E.K., Paquier. A. 2008. Boundary Shear Stress in Open Channel Flow; A Comparison Among Six Methods, *Journal of Hydraulic Research*, Vol 46, No 5, pp 598-609.
- 13) Huser, A., Biringen, S., 1993. Direct numerical simulation of turbulent flow in a square duct, *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 257, pp. 65-95.

Numerical investigation of the secondary current pattern in the open channel with different roughness forms on the bed

Narjes Shahbeygi¹, Bahareh Pirzadeh^{*2}

1- M.Sc Student, Civil Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2- Assistant Professor, Civil Engineering Department, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

b-pirzadeh@eng.usb.ac.ir*

Abstract

It is important in Hydraulic and river engineering to estimate the mean velocity and turbulence intensity to identify the presence of secondary currents, its shape and position. The flow of channels consists of three components of velocity, one component in the direction of flow and two components in the transverse direction of the channel. Due to the heterogeneity of the velocity fluctuations, a series of vortex vortices in the channel section to be formed which is called secondary currents cells. The secondary currents are dependent on factors such as bed roughness, channel slope and shear stress. The present study investigates the effect of bed roughness form on the pattern of secondary currents with numerical modeling in Flow-3D software by using RNG turbulent model. This research has been carried out according to the data of the Negara laboratory model carried out at the Hydraulic Laboratory of Singapore National University. In the results obtained from the mean velocity profile, the mean error for triangular roughness trough was 9.94% and for roughness crest was 3.71%. in the case of shear velocity, the error for triangular roughness was obtained at three cross sections $x=4$, $x=5$ and $x=6$ respectively 6.58%, 6.86% and 5.67% which demonstrates the good fit of the numerical model results with the reference laboratory model. The flow conditions in the channel were designed and studied for three types (rectangular roughness, trapezoidal roughness with an internal angle of 80 degrees and trapezoidal roughness with an internal angle of 55 degrees) of roughness that are most used in hydraulic structures. The results of the study on the turbulence intensity, secondary currents and turbulence kinetic energy showed the effect of trapezoidal roughness with an internal angle of 55 degrees relative to the other two forms of roughness. The difference in the turbulence intensity in trapezoidal roughness with an internal angle of 55 degrees relative to a triangular roughness at a height of 0.1 meter from the channel bed was obtained at about 4.54%, which is affected by a sharp roughness. The location of the center of the contour nucleus begins in the depth of about 0.2 meters, due to channel size $B/H=1.5$ of less than 5, the channel is narrow and justifies the presence of vortices in the middle. On the other hand, the tendency of cells to the left and right walls of the canal is also affected by roughness geometry with also different from the deformation of the location of these cells. In trapezoidal roughness with an internal angle of 55 degrees, there is a tendency to both walls. The turbulence kinetic energy contour with the center of the nucleus begins at the roughness crest with an approximate value of 0.0002 for all roughness, but its location is different in relation to the roughness geometry. In fact, the turbulence kinetic energy is the effect of oscillating velocity components that the existence of external rotations is the effect of the redistribution of energy by velocity tensor, which is responsible for the formation of secondary current cells.

Keyword: Secondary currents, Roughness form, Turbulence intensity, Turbulence kinetic energy, Flow-3D