

## مطالعه تحلیلی میدان جریان در کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا با استفاده از روش اصلاح‌شده SKM

بهرام رضائی<sup>۱\*</sup>، محبوبه شمسی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

<sup>۲</sup> فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد عمران- مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

(دریافت: ۹۷/۱۱/۸، پذیرش: ۹۹/۲/۳۱، نشر آنلاین: ۹۹/۲/۳۱)

### چکیده

ماهیت سه‌بعدی جریان در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های منشوری، پیش‌بینی توزیع سرعت و تنش برشی را برای مهندسی هیدرولیک به امری دشوار تبدیل کرده است. این پیچیدگی‌ها در مواقعی که سیلاب‌دشت‌ها از حالت منشوری به غیرمنشوری تغییر شکل دهند، افزایش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد. در کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا، به دلیل تغییرات هندسی کانال، تبادل جرم و به دنبال آن اندرکنش بین جریان سیلاب‌دشت‌ها و کانال اصلی افزایش می‌یابد. در این تحقیق براساس معادله دیفرانسیل ناویه- استوکس (Navier-Stokes) متوسط‌گیری شده در عمق، یک روش تحلیلی ارائه و با استفاده از آن، توزیع سرعت متوسط در عمق و تنش برشی جداره در کانال مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور و جهت در نظر گرفتن تأثیر جریان ثانویه در معادله دیفرانسیل ناویه- استوکس متوسط‌گیری شده در عمق، متوسط زمانی حاصل ضرب مؤلفه‌های سرعت، متناسب با حاصل ضرب مؤلفه‌های سرعت متوسط در عمق، در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل غیریکنواختی جریان شیب خط انرژی در معادله حاکم جایگزین شیب طولی کانال شده است. سپس نتایج سرعت متوسط در عمق و تنش برشی پیش‌بینی شده در کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های همگرا برای دو زاویه همگرایی ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه، با نتایج حاصل از روش شیونو و نایت (Shiono and Knight Method)، روش شیونو و نایت اصلاح‌شده به‌وسیله Rezaei و Knight (۲۰۰۹)، و نیز داده‌های آزمایشگاهی مربوطه مقایسه شده است. بررسی‌ها حکایت از انطباق بهتر داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از روش تحلیلی ارائه‌شده، دارد.

**کلیدواژه‌ها:** کانال مرکب غیرمنشوری، معادلات ناویه- استوکس، روش اصلاح‌شده شیونو و نایت.

### ۱- مقدمه

سرعت‌های متفاوت در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها جریان می‌یابد. این اختلاف سرعت سبب ایجاد یک لایه برشی در فصل مشترک بین جریان سریع در کانال اصلی و جریان کند در سیلاب‌دشت‌ها می‌شود این موضوع توسط پژوهشگران بسیاری از جمله Sellin (۱۹۶۴)، Tominaga و Nezu (۱۹۹۱)؛ Ikeda (۱۹۹۹)، Bousmar (۲۰۰۲)؛ Rezaei (۲۰۰۶)؛ و Knight (۲۰۱۱) نشان داده شده است.

Wormleaton (۱۹۹۶)، بیان نمود که اثرات این لایه برشی در سیلاب‌دشت‌ها گسترش یافته و با نزدیک شدن به دیوارها به صفر میل می‌کند. بر مبنای نگرش دو بعدی، روش توزیع عرضی به‌وسیله Wormleaton (۱۹۸۸)، Knight و همکاران (۱۹۸۹) و Wark و همکاران (۱۹۹۰) ارائه شد. این روش با استفاده از معادلات ناویه- استوکس متوسط‌گیری شده در عمق و برای جریان

از گذشته‌های دور تاکنون مهندسان رودخانه به دنبال یافتن راهی بوده‌اند که در عین بهره جستن از مزایای زندگی در نزدیک رودخانه‌ها، خطرات و خسارات ناشی از جاری شدن سیل را به حداقل کاهش دهند. رودخانه‌ها در حالت طبیعی دارای مقطع مرکب بوده و عموماً جریان در مقطع اصلی رودخانه برقرار است. در زمان وقوع سیل و با افزایش دبی جریان، مقدار آبی که بیشتر از ظرفیت انتقال کانال اصلی است وارد زمین‌های اطراف رودخانه (سیلاب‌دشت‌ها) می‌شود. بنابراین جهت شبیه‌سازی جریان در رودخانه‌ها و بررسی پیچیدگی‌های آن، پژوهشگران هیدرولیک اقدام به بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی جریان در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های منشوری و غیرمنشوری نموده‌اند. در کانال‌های مرکب منشوری به دلیل اختلاف در زبری و نیز عمق جریان، آب با

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۸۳۰۸۱۸۹۱

به بررسی‌های بیشتری دارد.

Devi و Khatua (۲۰۱۷) با مطالعه تأثیر هندسه کانال بر پارامتر K (در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها) روشی برای کالیبره کردن این پارامتر در روش SKM ارائه کرده و نتایج قابل قبولی در پیش‌بینی سرعت متوسط در عمق و تنش برشی به‌دست آوردند. Alawadi و همکاران (۲۰۱۸) نیز روش SKM را برای پیش‌بینی توزیع سرعت متوسط در عمق و تنش برشی در کانال‌های مرکب نامتقارن دوزنقه‌ای با شیب دیوارهای مختلف به‌کار بردند. آنان برای کالیبره کردن پارامتر مربوط به جریان ثانویه  $\Gamma$  از دو روش پیشنهادی Abril و Knight (۲۰۰۴) و Devi و Khatua (۲۰۱۷) استفاده کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که روش توسعه داده‌شده به‌وسیله Devi و Khatua (۲۰۱۷) نسبت به زمانی که پارامتر جریان ثانویه ثابت فرض می‌شود نتایج بهتر ارائه می‌دهد.

روش Ervine و همکاران (۲۰۰۰) برای شبیه‌سازی جریان یکنواخت (عمق ثابت) در کانال‌های مرکب پیچان پیشنهاد شده است. Rezaei و Knight (۲۰۰۹) نیز جهت در نظر گرفتن غیریکنواختی جریان در کانال‌های مرکب غیرمنشوری، شیب خط انرژی را جایگزین شیب کف کانال کرده اما همانند روش SKM گرادیان عرضی تنش برشی ناشی از جریان‌های ثانویه را با اعمال پارامتر ثابت  $\Gamma$  جایگزین کردند. هدف از این تحقیق امکان تلفیق فرضیات روش‌های Ervine و همکاران (۲۰۰۰) و Rezaei و Knight (۲۰۰۹) جهت ارائه یک روش تحلیلی، به منظور پیش‌بینی دقیق‌تر توزیع سرعت متوسط در عمق و تنش برشی در جریان غیریکنواخت در کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا است.

## ۲- تجهیزات آزمایشگاهی و روش‌های آزمایش

به‌منظور بررسی تأثیر همگرایی سیلاب‌دشت‌ها بر روی توزیع سرعت و تنش برشی جداره در کانال مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا با زوایای تقارب  $11/31$  و  $3/81$  درجه، Rezaei (۲۰۰۶) آزمایش‌هایی انجام داد.

در نام‌گذاری این آزمایش‌ها از حروف اختصاری ONPC<sup>۵</sup> به همراه سه کد عددی استفاده شده است. کد اول نشان‌دهنده طول ناحیه همگرایی کانال، کد عددی دوم نشان‌دهنده عرض سیلاب‌دشت در انتهای ناحیه همگرا و درنهایت کد عددی سوم نشان‌دهنده عمق نسبی است (Rezaei, ۲۰۰۶).

آزمایش‌ها بر روی یک فلوم<sup>۶</sup> ۱۸ متری در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بیرمنگام انجام شده است. مقطع اصلی کانال به‌صورت مستطیلی با ابعاد ۱۱۹۸ در ۴۰۰ میلی‌متر و در شیب کف

یکنواخت پایدار توسعه داده شده است. در روش توزیع عرضی، اثرات ویسکوزیته<sup>۱</sup> گردابی و جریان‌های ثانویه در نظر گرفته می‌شود. در این روش زبری جدار به‌وسیله ضریب مانینگ<sup>۲</sup> (Wark و همکاران، ۱۹۹۰) و یا به‌وسیله ضریب اصطکاک داریسی-ویسباخ<sup>۳</sup> برآورد می‌شود. ویسکوزیته گردابی نیز متناسب با سرعت برشی (Knight و همکاران، ۱۹۸۹) فرض شده و یا به‌وسیله مدل طول اختلاط (Sellin Lambert, ۱۹۹۶) تخمین زده می‌شود. اثر جریان ثانویه نیز می‌تواند توسط یک پارامتر ثابت (Shiono و Knight, ۱۹۹۱) شبیه‌سازی شود. Ervine و همکاران (۲۰۰۰) جریان ثانویه در کانال‌های پیچان را به‌وسیله رابطه‌ای که در آن از توان دوم سرعت طولی استفاده شده، شبیه‌سازی نمودند (Rezaei و Knight, ۲۰۰۹).

روش‌های مبتنی بر توزیع عرضی از جمله روش SKM<sup>۴</sup>، نتایج قابل قبولی در کانال‌های مرکب منشوری ارائه دادند. روش شیونو و نایت (SKM) یک راه‌حل تحلیلی برای توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق ارائه می‌کند Rezaei و Knight (۲۰۰۹) با جایگزین کردن شیب خط انرژی در روش شیونو و نایت (MSKM) آن را اصلاح و برای پیش‌بینی توزیع سرعت متوسط در عمق و تنش برشی در کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا به‌کار بردند. یافته‌های آن‌ها حاکی از انطباق قابل قبول بین داده‌های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از روش ارائه‌شده، داشت. Ervine و همکاران (۲۰۰۰) از روش SKM برای شبیه‌سازی جریان در کانال‌های پیچان استفاده کردند. آنان برای شبیه‌سازی تنش برشی جداره جمله مربوط به جریان‌های ثانویه  $(\rho UV)_d$  از توان دوم مؤلفه طولی سرعت  $(\rho KU_d)^2$  استفاده نمودند. آنان اظهار کردند که اگر در انتخاب ثابت تناسب این رابطه توانی (K) دقت شود، مدل ارائه‌شده می‌تواند توزیع تنش برشی و توزیع سرعت متوسط در عمق را در کانال‌های پیچان به‌خوبی برآورد کند.

Kordi و همکاران (۲۰۱۵) روش بهبودیافته شیونو و نایت را پیشنهاد دادند. آنان بیان نمودند که روش Ervine و همکاران (۲۰۰۰) نمی‌تواند توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق را در ناحیه فصل مشترک کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها به‌درستی پیش‌بینی کند و این اختلاف به‌دلیل عدم دقت در مدل کردن جریان‌های ثانویه در این ناحیه است. در این روش جریان‌های ثانویه به‌صورت کامل اعمال شده که شامل مؤلفه انتقال عرضی و آشفتگی است. روش پیشنهادی Kordi و همکاران (۲۰۱۵) دقت زیادی در پیش‌بینی سرعت متوسط در عمق در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در کانال‌های مرکب مستقیم متقارن و نامتقارن، همگن و ناهمگن داشته اما برای کانال‌های پیچان نیاز

4. Shiono and Knight Method

5. Overbank Flow in Non-Prismatic Compound Channel

6. Flume

1. Viscosity

2. Manning

3. Darcy-Weisbach

قطر خارجی ۴/۷۷ میلی‌متر در همان مقطعی که سرعت متوسط در عمق اندازه‌گیری شده، انجام شده است. تنش برشی جداره در پیرامون محیط تر شده کانال، در فواصل ۱۰ میلی‌متری روی دیوار و فواصل ۲۵ میلی‌متری در کف کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها اندازه‌گیری شده است (Rezaei, ۲۰۰۶).

### ۳- معادلات حاکم

متوسط زمانی معادله اندازه حرکت در جهت جریان (معادله ناویه-استوکس) برای جریان پایدار غیریکنواخت در کانال مرکب غیرمنشوری را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} - \rho g \frac{\partial H}{\partial x} + \rho g \frac{\partial z_b}{\partial x} = \rho \left( u \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \quad (1)$$

در این رابطه  $\rho$  جرم مخصوص آب،  $S_0 = -\partial z_b / \partial x$  شیب کف کانال،  $z_b$  ارتفاع کف کانال،  $H$  عمق جریان،  $\bar{u}$ ،  $\bar{v}$  و  $\bar{w}$  مؤلفه‌های متوسط زمانی بردار سرعت به ترتیب در راستای محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$ ،  $\tau_{yx}$  مؤلفه تنش برشی در راستای محور  $x$  بر روی صفحه‌ای که محور  $y$  بر آن عمود است و  $\tau_{zx}$  مؤلفه تنش برشی در راستای محور  $x$  بر روی صفحه‌ای که محور  $z$  بر آن عمود است. با مرتب کردن رابطه (۱) می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} - \rho g \frac{\partial}{\partial x} \left( z_b + H + \frac{-2}{2g} \right) = \rho v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (2)$$

در رابطه فوق به‌جای عبارت داخل پرانتز  $(z_b + H + u^2/2g)$  می‌توان ارتفاع نظیر انرژی کل ( $H_e$ ) را جایگزین کرد. گرادیان این عبارت در راستای محور  $x$  بیان‌کننده شیب خط انرژی ( $S_e$ ) در این جهت است (Rezaei و Knight, ۲۰۰۹).

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} - \rho g S_e = \rho v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \quad (3)$$

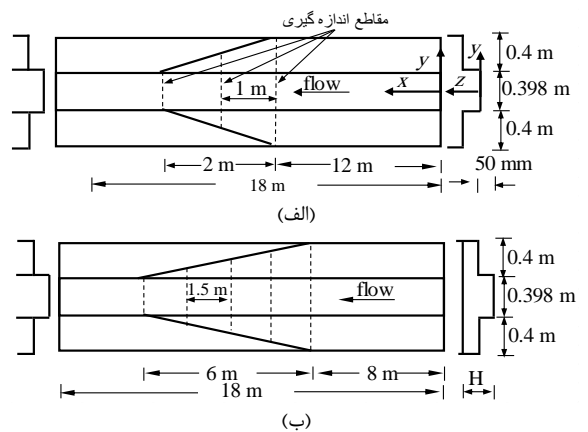
با استفاده از قضیه لاینیتز<sup>۸</sup> و با انتگرال‌گیری از رابطه (۳) بر روی عمق موضعی  $H$  و نیز با اعمال شرایط مرزی مربوط مؤلفه قائم  $\bar{w}$  که بر روی کف کانال و سطح آب برابر صفر است، خواهیم داشت (Knight و Shiono؛ ۱۹۸۸، Knight و Shiono؛ ۱۹۹۰، Knight و همکاران، ۱۹۸۹).

۱-۳- اندازه‌گیری سرعت متوسط در عمق ساخته شده است. سپس با استفاده از ورق‌های P.V.C مقطع مرکب مستطیلی با سیلاب‌دشت‌هایی به عرض ۴۰۰ میلی‌متر و کانال اصلی به عرض ۳۹۸ میلی‌متر و عمق ۵۰ میلی‌متر در آن ایجاد کرده‌اند. برای به‌وجود آوردن سیلاب‌دشت‌ها همگرا از پروفیل L شکل آلومینیوم استفاده شده است (Rezaei, ۲۰۰۶). آزمایش‌های سری ONPC2-0 و ONPC6-0 در کانال مرکب غیرمنشوری با طول ناحیه همگرایی ۲ و ۶ متر (زاویه‌های همگرایی به ترتیب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه) انجام شده است.

به‌منظور مقایسه نتایج آزمایشگاهی در کانال مرکب غیرمنشوری با زوایای همگرایی مختلف، برای هر دبی انتخابی، سطح آب در پایین دست با استفاده از دریچه به نحوی تنظیم شده که سه عمق نسبی ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ در میانه ناحیه همگرایی کانال تشکیل شود (شکل (۱) نمای شماتیک کانال آزمایشگاهی را نشان می‌دهد).

### ۲- اندازه‌گیری سرعت متوسط در عمق

اندازه‌گیری سرعت متوسط در عمق با استفاده از سرعت‌سنج پروانه‌ای مینیاتوری در فاصله ۰/۴H از کف کانال اصلی و  $(H-h)/0.4$  از کف سیلاب‌دشت و در فواصل عرضی ۲۵ میلی‌متر انجام شده است. مطابق شکل (۱)، در آزمایش‌های سری ONPC2-0، اندازه‌گیری سرعت متوسط در عمق در سه مقطع و آزمایش‌های سری ONPC6-0، اندازه‌گیری سرعت در پنج مقطع انجام شده است.



شکل ۱- نمای شماتیک از کانال مرکب غیرمنشوری و مقاطع اندازه‌گیری (Rezaei, ۲۰۰۶): الف) آزمایش‌های سری ONPC2-0، ب) آزمایش‌های سری ONPC6-0

### ۲-۲- اندازه‌گیری تنش برشی

اندازه‌گیری تنش برشی موضعی با استفاده از لوله پرستون<sup>۷</sup> به

$$\gamma_1, \gamma_2 = \frac{(-K) \pm \sqrt{(-K)^2 + 2\lambda \left(\frac{f}{8}\right)^{3/2}}}{\sqrt{\frac{f}{8} \cdot \lambda H}} \quad (11)$$

با داشتن رابطه توزیع سرعت در عمق تنش برشی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\tau_b = \rho \frac{f}{8} \bar{U}_d^2 \quad (12)$$

#### ۴- تعیین ضرایب روش تحلیلی

روش تحلیلی ارائه شده دارای سه ضریب، شامل ضریب اصطکاک  $f$ ، ضریب ویسکوزیته گردابه‌ای بدون بعد  $\lambda$  و ثابت تناسب  $K$  است که مقادیر آن‌ها باید در کانال اصلی و سیلاب‌دشته‌ها تعیین شود.

#### ۴-۱- ضریب اصطکاک $f$

با استفاده از داده‌های سرعت متوسط در عمق و تنش برشی در کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا و با زوایای  $11/31$  و  $3/81$  درجه، ضرایب اصطکاک موضعی در کانال اصلی ( $f_{mc}$ ) و سیلاب‌دشت‌ها ( $f_{fp}$ ) با استفاده از رابطه دارسی-ویسباخ محاسبه شده است (Rezaei, 2006). مقادیر ضریب اصطکاک برای دو زاویه همگرایی و عمق‌های نسبی ( $Dr$ ) مختلف با داده‌ها مربوط به کانال‌های مرکب منشوری با عرض سیلاب‌دشت‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر (آزمایش‌های سری OPC200 و OPC400) مقایسه و در شکل (۲) نشان داده شده است (Knight و Rezaei, 2009).

بررسی شکل‌ها نشان می‌دهد که ضرایب اصطکاک در کانال اصلی ( $f_{mc}$ ) و سیلاب‌دشت‌ها ( $f_{fp}$ ) در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌ها منشوری و غیرمنشوری الگوی تقریباً مشابهی را دنبال می‌کنند. همچنین نتایج حاصل از آزمایش‌ها در کانال‌های منشوری عموماً ضریب اصطکاک را در سیلاب‌دشت‌ها کم برآورد می‌نماید (شکل ۲-ب)) بنابراین استفاده از این نتایج در روش ارائه شده برای کانال‌های غیرمنشوری منجر به اضافه برآورد سرعت متوسط در عمق و تنش برشی در سیلاب‌دشت‌ها می‌شود.

$$\rho g S_e H - \rho \frac{f}{8} \sqrt{1+s^2} \bar{U}_d^2 + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} \bar{U}_d \frac{\partial \bar{U}_d}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} [H(\rho \bar{V} \bar{U})_d] \quad (4)$$

در این رابطه  $s = -\partial z_b / \partial y$  شیب جانبی بستر کانال و  $\bar{U}_d$  سرعت متوسط در عمق بوده و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{U}_d = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_w} u dz \quad (5)$$

در این روابط  $g$  شتاب ثقل،  $\lambda$  ضریب بدون بعد ویسکوزیته گردابی،  $f$  ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ<sup>۹</sup> و  $z_w$  ارتفاع سطح آب است. با فرض این که در جمله تنش برشی ناشی از جریان ثانویه متوسط زمانی حاصل ضرب مؤلفه‌های سرعت  $(\bar{V} \bar{U})_d$ ، متناسب با حاصل ضرب مؤلفه‌های سرعت متوسط در عمق باشد می‌توان نوشت:

$$(\bar{V} \bar{U})_d = K_1 \bar{V}_d \bar{U}_d \quad (6)$$

و نیز با فرض تناسب مؤلفه سرعت عرضی  $\bar{V}_d$  با سرعت طولی  $\bar{U}_d$  خواهیم داشت:

$$(\bar{V} \bar{U})_d = K_1 (K_2 \bar{U}_d) \bar{U}_d = K \bar{U}_d^2 \quad (7)$$

$$\rho g S_e H - \rho \frac{f}{8} \sqrt{1+s^2} \bar{U}_d^2 + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} \bar{U}_d \frac{\partial \bar{U}_d}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} [H(\rho K \bar{U}_d^2)] \quad (8)$$

در این رابطه  $K$  ثابت تناسب است. برای کانال مرکب با مقطع مستطیلی شکل  $s=0$  و معادله (۸) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\rho g S_e H - \rho \frac{f}{8} \bar{U}_d^2 + \rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \bar{U}_d^2}{\partial y^2} = H \rho K \frac{\partial \bar{U}_d^2}{\partial y} \quad (9)$$

جواب معادله دیفرانسیل فوق عبارت است از:

$$\bar{U}_d = [A_1 e^{\gamma_1 y} + A_2 e^{\gamma_2 y} + \kappa]^{1/2} \quad (10)$$

در این رابطه  $\kappa = \frac{8gHS_e}{f}$  بوده و  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  از رابطه زیر تعیین می‌شوند:

شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در کانال‌های غیرمنشوری در این تحقیق نیز مؤید این است که در روش تحلیلی ارائه‌شده، حساسیت نسبت به ضریب ویسکوزیته گردابی  $\lambda$  کم است.

#### ۴-۳- ضریب ثابت $K$

در این پژوهش جمله مربوط به تنش برشی ناشی از جریان ثانویه  $(\rho \overline{VU})_d$ ، برحسب سرعت متوسط در عمق و به صورت  $(\rho K \overline{U} d^2)$  تقریب زده شده است. در این تقریب پارامتر  $K$  با توجه به زاویه تقارب سیلاب‌دشت‌ها و به روش سعی و خطا به نحوی تعیین شده که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از معادله (۹)، با داده‌های آزمایشگاهی بهترین انطباق را داشته باشد. به عنوان مثال مقدار ضریب  $K$  در قسمت میانی ناحیه همگرا و در نزدیکی دیواره سیلاب‌دشت‌ها برای آزمایش‌های سری ONPC2-0 و ONPC6-0 به ترتیب ۰/۰۸ و ۰/۰۴ برآورد شده است. با دور شدن از دیواره‌های سیلاب‌دشت‌ها و به دلیل غلبه مؤلفه طولی بردار سرعت، مقدار این ضریب کاهش یافته و در نزدیک محور کانال اصلی به ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۵ میل خواهد کرد.

#### ۵- کاربرد روش تحلیلی در کانال‌های مرکب غیرمنشوری

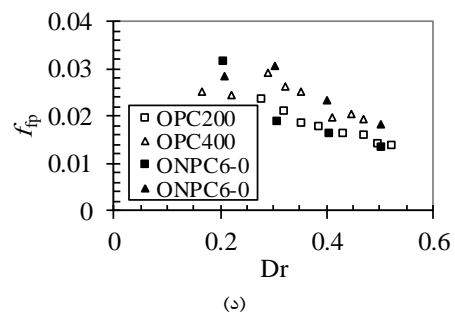
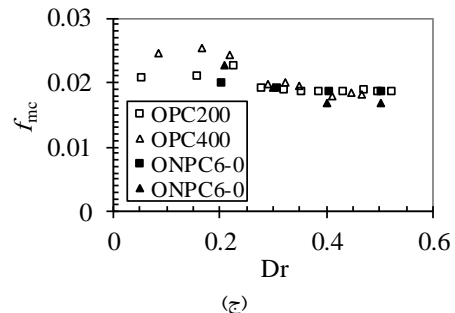
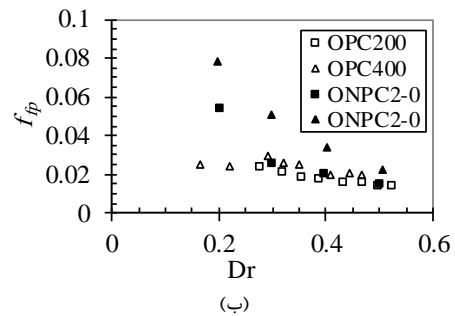
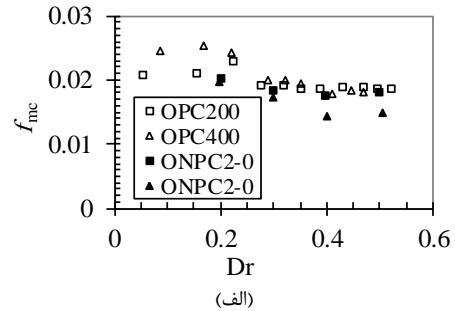
##### با سیلاب‌دشت‌های همگرا

در کانال‌های مرکب غیرمنشوری به دلیل تغییر ابعاد و شکل مقطع شرایط جریان غیریکنواخت بوده و در نتیجه شیب خط انرژی  $S_e$  کم‌تر از شیب کف کانال  $S_0$  می‌باشد.

Knight و Rezaei (۲۰۰۹) با محاسبه شیب خط انرژی در طول کانال مرکب غیرمنشوری نشان دادند که اختلاف بین شیب خط انرژی و شیب کف کانال در ابتدا و انتهای ناحیه همگرای کانال قابل‌ملاحظه بوده و با افزایش عمق نسبی افزایش می‌یابد. بنابراین به کار بردن شیب کف کانال در روش SKM موجب اضافه برآورد سرعت متوسط در عمق و تنش برشی در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها خواهد شد.

#### ۶- نتایج شبیه‌سازی و بحث

با استفاده از روش تحلیلی ارائه‌شده (Analy) سرعت متوسط در عمق و تنش برشی در ابتدای و میانه ناحیه همگرای کانال برای سری آزمایش‌ها ONPC2-0 و ONPC6-0، شبیه‌سازی شده است. سپس نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با نتایج روش SKM، روش شیونو و نایت اصلاح‌شده به وسیله Rezaei و Knight (۲۰۰۹) (MSKM) و با داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده در همان مقاطع مقایسه شده است (شکل‌های (۳) تا (۶) نتایج حاصل از این شبیه‌سازی را نشان می‌دهد).

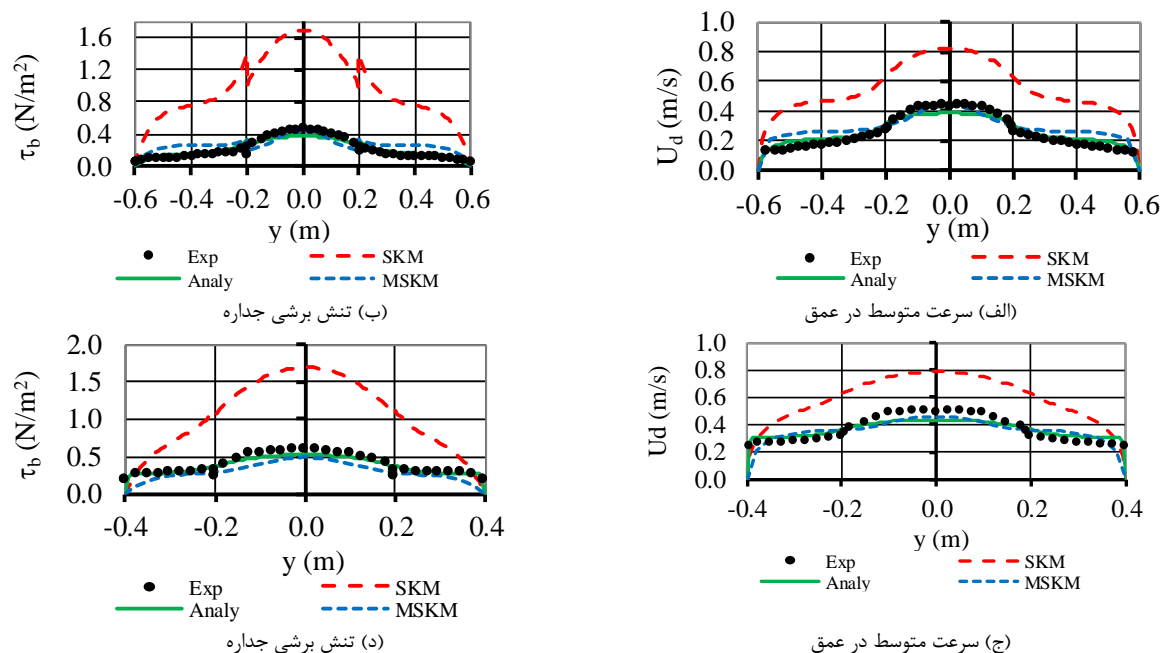


شکل ۲- مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها برحسب عمق نسبی  $(Dr)$  در کانال‌های مرکب منشوری و غیرمنشوری با زوایای تقارب: الف) و ب) ۱۱/۳۱ درجه، ج) و د) ۳/۸۱ درجه (Knight و Rezaei، ۲۰۰۹)

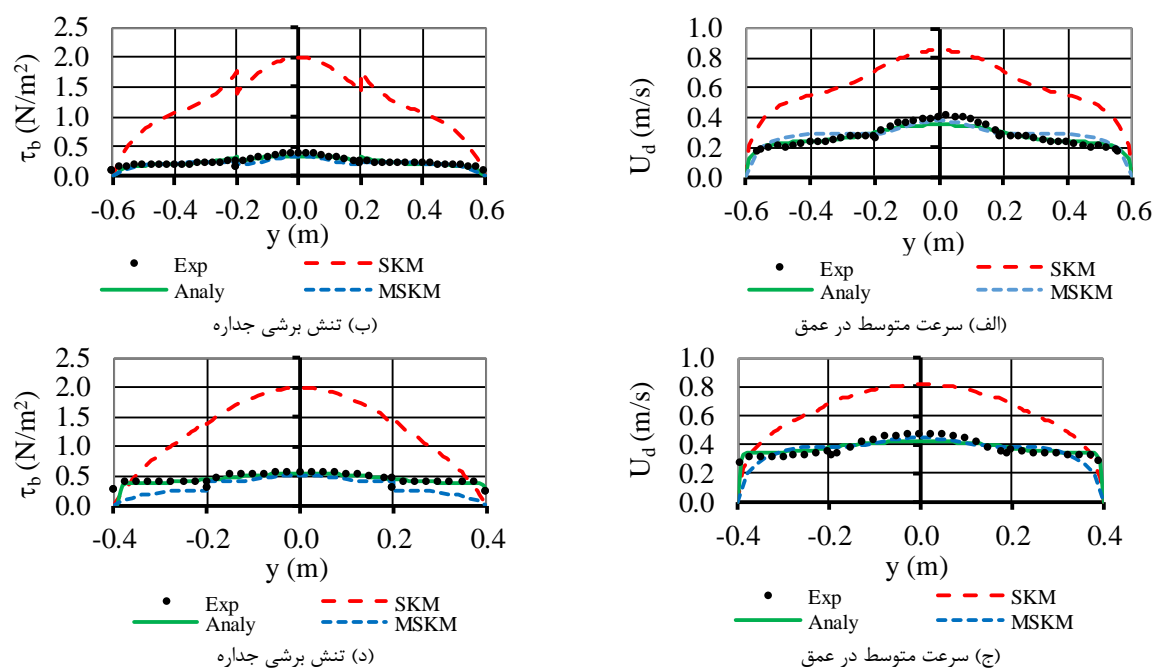
#### ۴-۲- ویسکوزیته گردابی بدون بعد $\lambda$

با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، Knight و Abril (۲۰۰۴) نشان دادند که روش SKM نسبت به تغییرات  $\lambda$  خیلی حساسیت نداشته و مقدار  $\lambda_{mc} = 0.07$  را برای کانال اصلی و رابطه زیر را برای تعیین این ضریب در سیلاب‌دشت‌ها پیشنهاد دادند.

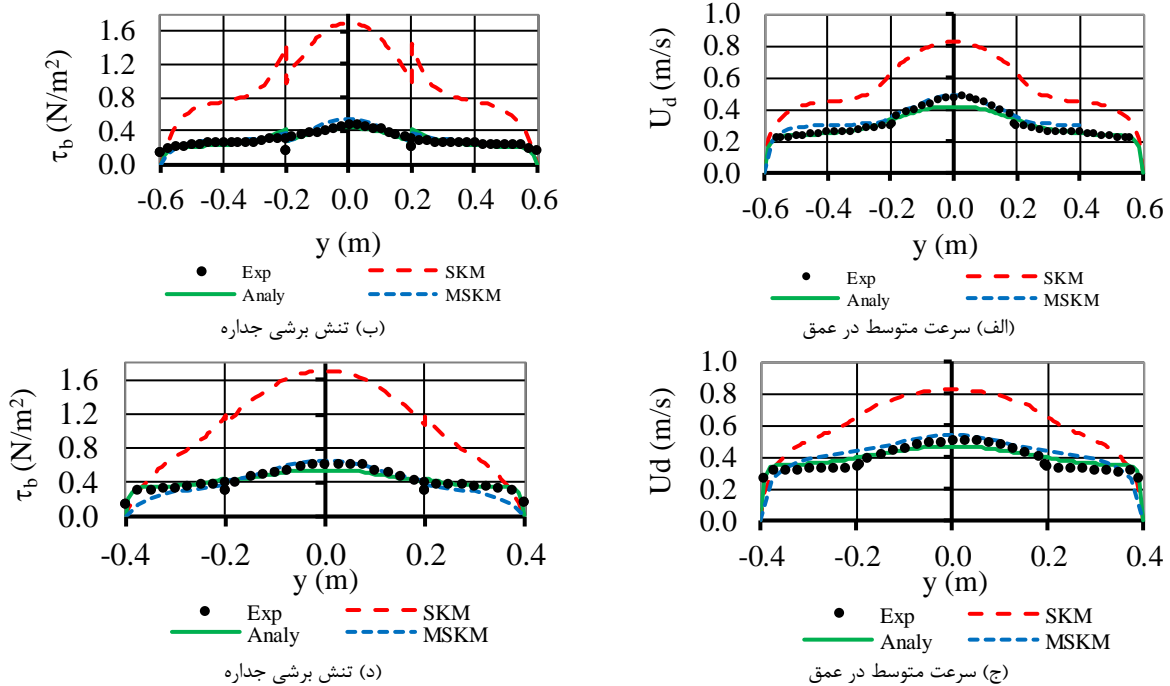
$$\lambda_{ip} = \lambda_{mc} (-0.2 + 1.2Dr^{-1.44}) \quad (13)$$



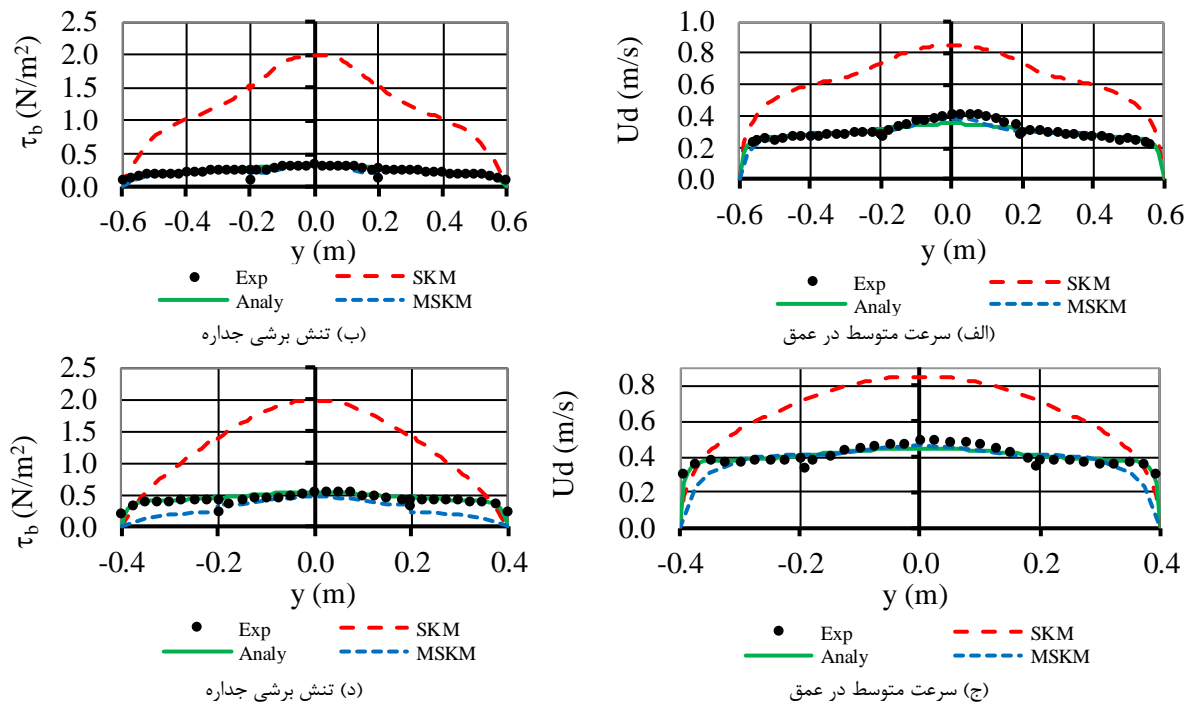
شکل ۳- مقایسه نمودار توزیع سرعت متوسط عمق و تنش برشی به روش تحلیلی ارائه شده (Analy)، روش معمول SKM، روش SKM اصلاح شده به وسیله Rezaei و Knight (MSKM) و داده‌های آزمایشگاهی (Exp) در (الف) و (ب) ابتدا ناحیه همگرا و (ج) و (د) وسط ناحیه همگرا برای آزمایش سری ONPC2-0-0.4



شکل ۴- مقایسه نمودار توزیع سرعت متوسط عمق و تنش برشی به روش تحلیلی ارائه شده (Analy)، روش معمول SKM، روش SKM اصلاح شده به وسیله Rezaei و Knight (MSKM) و داده‌های آزمایشگاهی (Exp) در (الف) و (ب) ابتدا ناحیه همگرا و (ج) و (د) وسط ناحیه همگرا برای آزمایش سری ONPC2-0-0.5



شکل ۵- مقایسه نمودار توزیع سرعت متوسط عمق و تنش برشی به روش تحلیلی ارائه شده (Analy)، روش معمول SKM، روش SKM اصلاح شده به وسیله Rezaei و Knight (MSKM) و داده‌های آزمایشگاهی (Exp) در (الف) و (ب) ابتدا ناحیه همگرا و (ج) و (د) وسط ناحیه همگرا برای آزمایش سری ONPC6-0-0.4

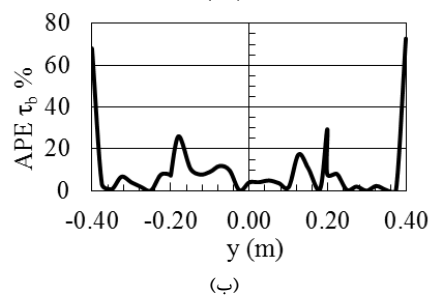
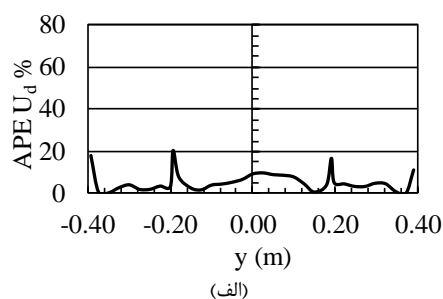


شکل ۶- مقایسه نمودار توزیع سرعت متوسط عمق و تنش برشی به روش تحلیلی ارائه شده (Analy)، روش معمول SKM، روش SKM اصلاح شده به وسیله Rezaei و Knight (MSKM) و داده‌های آزمایشگاهی (Exp) در (الف) و (ب) ابتدا ناحیه همگرا و (ج) و (د) وسط ناحیه همگرا برای آزمایش سری ONPC6-0-0.5

جدول ۲- متوسط درصد خطای مطلق نقطه‌ای مربوط به سرعت متوسط در عمق و تنش برشی برای آزمایش‌های سری ONPC6-0

عنوان آزمایش	$x$ (m)	$U_d$ (%)	$\tau_b$ (%)
ONPC6-0-0.3	۸	۷/۴۷	۱۳/۵۲
ONPC6-0-0.3	۱۱	۹/۸۸	۶/۲۶
ONPC6-0-0.4	۸	۵/۱۶	۱۱/۳۴
ONPC6-0-0.4	۱۱	۶/۹۱	۷/۲۴
ONPC6-0-0.5	۸	۴/۷۷	۷/۳۲
ONPC6-0-0.5	۱۱	۴/۹۷	۶/۹۱
میانگین درصد خطا		۶/۵۲	۸/۷۷

به‌منظور بررسی دقت روش ارائه‌شده در پیش‌بینی میدان جریان در نواحی مختلف کانال آزمایشگاهی نمودار تغییرات عرضی درصد خطای مطلق نقطه‌ای مربوط به سرعت متوسط در عمق و تنش برشی برای آزمایش سری ONPC6-0-0.5 محاسبه و در شکل (۷) ترسیم شده است.



شکل ۷- تغییرات درصد خطای مطلق نقطه‌ای در وسط ناحیه همگرا در آزمایش ONPC6-0-0.5: الف) سرعت متوسط در عمق، ب) تنش برشی جداره

از شکل (۷) می‌توان دریافت که بیشترین مقدار خطا در دیوارهای سیلاب‌دشت‌ها و نیز فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها اتفاق می‌افتد و این امر نشان‌دهنده آن است که پیچیدگی‌های ناشی از جریان‌های ثانویه و آشفتگی‌های جریان ناشی از انتقال اندازه حرکت در این نواحی از کانال به‌خوبی مدل نشده است. در نتیجه مقادیر بالای خطای روش ارائه‌شده در نزدیک دیوارها و فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها باعث

بررسی شکل‌ها بیان‌کننده این واقعیت است که انطباق قابل قبولی بین نتایج حاصل از روش تحلیلی با داده‌های آزمایشگاهی وجود داشته و این انطباق عموماً در وسط ناحیه همگرا نسبت به ناحیه ابتدایی بیشتر است. همچنین روش ارائه‌شده در این تحقیق نسبت به روش (MSKM) ارائه‌شده به‌وسیله Rezaei و Knight (۲۰۰۹)، انطباق بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی دارد. به‌منظور بررسی دقت روش ارائه تحلیلی ارائه‌شده (Analy)، متوسط درصد خطای مطلق نقطه‌ای (MAPE) مربوط به سرعت متوسط در عمق و تنش برشی در سری آزمایش‌های ONPC2-0 و ONPC6-0 با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه و در جدول (۱) و (۲) آورده شده است.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{i \text{ Exp}} - X_{i \text{ Analy}}}{X_{i \text{ Exp}}} \right| \times 100 \quad (14)$$

در این رابطه  $X_{i \text{ Exp}}$  پارامتر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی و  $X_{i \text{ Analy}}$  پارامتر محاسبه‌شده به روش تحلیلی و  $N$  تعداد داده‌ها است. با توجه به جدول‌های (۱) و (۲) می‌توان دریافت که در حالت کلی دقت روش تحلیلی ارائه‌شده (Analy) برای پیش‌بینی توزیع سرعت متوسط در عمق و تنش برشی جداره، با افزایش عمق نسبی افزایش می‌یابد.

جدول ۱- متوسط درصد خطای مطلق نقطه‌ای (MAPE) مربوط به سرعت متوسط در عمق و تنش برشی برای آزمایش‌های سری ONPC2-0

عنوان آزمایش	$x$ (m)	$U_d$ (%)	$\tau_b$ (%)
ONPC2-0-0.3	۱۲	۱۶/۷۱	۶/۰۵
ONPC2-0-0.3	۱۳	۱۶/۵۸	۱۳/۱۳
ONPC2-0-0.4	۱۲	۱۳/۶۲	۱۰/۱۰
ONPC2-0-0.4	۱۳	۱۳/۴۶	۱۶/۷۵
ONPC2-0-0.5	۱۲	۸/۰۹	۶/۷۱
ONPC2-0-0.5	۱۳	۷/۵۲	۹/۷۲
میانگین درصد خطا		۱۲/۶۶	۱۰/۴۱

بررسی‌ها همچنین بیان‌گر این است که با کاهش زاویه تقارب سیلاب‌دشت‌ها از ۱۱/۳۱ درجه به ۳/۸۱ درجه دقت روش ارائه‌شده افزایش می‌یابد. میانگین درصد خطای توزیع سرعت پیش‌بینی-شده به‌وسیله روش تحلیلی (Analy) برای زوایای تقارب ۱۱/۳۱ و ۳/۸۱ درجه به‌ترتیب ۱۲/۶۶ و ۶/۵۲ درصد بوده در حالی که این خطا در مورد تنش برشی به‌ترتیب ۱۰/۴۱ و ۸/۷۷ می‌باشند.



۴- با مقایسه شبیه‌سازی توزیع سرعت متوسط در عمق و تنش برشی با داده‌های آزمایش‌های سری ONPC2-0 و ONPC6-0 می‌توان دریافت که با کاهش زاویه همگرایی از ۱۱/۳۱ به ۳/۸۱ دقت روش تحلیلی ارائه‌شده افزایش می‌یابد.  
۵- با افزایش نسبی عمق، دقت روش ارائه‌شده برای پیش‌بینی سرعت متوسط در عمق و تنش برشی افزایش می‌یابد.

#### ۸- مراجع

- Abrial B, Knight DW, "Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model", Journal of Hydraulic Research, IAHR, 2004, 42 (6), 616-629.
- Alawadi, W, Al-Rekabi WS, Al-Aboodi AH, "Application of the Shiono and Knight Method in asymmetric compound channels with different side slopes of the internal wall", Applied Water Science, 2018, 8 (4), 1-10.
- Bousmar D, "Flow modeling in compound channels- Momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains", PhD Thesis, Universite Catholique de Louvain, Belgium, 2002.
- Devi K, Khatua K, "Depth-averaged velocity and boundary shear stress prediction in asymmetric compound channels", Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, 42 (9), 3849-3862.
- Ervine DA, Babaeyan Koopaei K, Sellin RHJ, "Two-Dimensional solution for straight and meandering overbank flows", Journal of Hydraulic Engineering, IAHR, 2000, 126 (9), 653-669.
- Ikedda S, "Role of lateral eddies in sediment transport and channel formation", River Sedimentation, Jayawardena, Lee and Wang, eds., Balkema Rotterdam, 1999, 195-203.
- Knight DW, Shiono K, Pirt J, "Prediction of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow", Proc. Int. Conf. on Hydraulic and Environmental Modeling of Coastal, Estuarine and River waters, (Ed. R. A. Falconer, P. Goodwin, R. G. S. Mathew), Gower Technical, University of Bradford, September, 1989, 38, 419-428.
- Kordi H, Amini R, Zahiri A, Kordi E, "Improved Shiono and Knight Method for overflow modeling", Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20 (12), 1-10.
- Lambert MF, Sellin RHJ, "Discharge prediction in straight compound channels using the mixing length concept", Journal of Hydraulic Research, IAHR, 1996, 34 (3), 381-394.
- Rezaei B, "Overbank flow in compound channels with prismatic and non-prismatic floodplains", PhD Thesis. University of Birmingham, Birmingham, UK, 2006.
- Rezaei B, Knight DW, "Application of the Shiono and Knight Method in compound channels with non-prismatic floodplains", Journal of Hydraulic Research, 2009, 47 (6), 716-726.
- Rezaei B, Knight DW, "Overbank flow in compound channels with non-prismatic floodplains", Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137 (8), 815-824.
- Sellin RHJ, "A laboratory investigation into the

افزایش متوسط درصد خطای مطلق نقطه‌ای این روش شده است. همچنین به منظور مقایسه دقت روش تحلیلی ارائه‌شده (Analy) با روش (MSKM) ارائه‌شده به‌وسیله Rezaei و Knight (۲۰۰۹)، متوسط درصد خطای مطلق نقطه‌ای سرعت متوسط در عمق و تنش برشی برای آزمایش‌های سری ONPC6-0 محاسبه و در جدول (۳) آورده شده است.

#### جدول ۳- متوسط درصد خطای مطلق نقطه‌ای مربوط به سرعت متوسط در عمق و تنش برشی برای آزمایش‌های سری ONPC6-0

به روش MSKM (Rezaei و Knight, ۲۰۰۹)

عنوان آزمایش	x (m)	U <sub>d</sub> (%)	τ <sub>b</sub> (%)
ONPC6-0-0.3	۸	۱۲/۹۲	۲۱/۰۵
ONPC6-0-0.3	۱۱	۸/۳۲	۲۱/۹۵
ONPC6-0-0.4	۸	۱۳/۴۴	۱۱/۸۳
ONPC6-0-0.4	۱۱	۱۴/۳۴	۱۵/۶۲
ONPC6-0-0.5	۸	۶/۴۷	۱۳/۰۷
ONPC6-0-0.5	۱۱	۸/۷۷	۳۶/۱۵
میانگین درصد خطا		۱۰/۷۳	۱۹/۹۵

با مقایسه جدول (۲) و (۳) می‌توان دریافت که دقت روش تحلیلی ارائه‌شده در این تحقیق (Analy) جهت پیش‌بینی توزیع عرضی سرعت متوسط در عمق و تنش برشی تقریباً دو برابر نتایج روش (MSKM) ارائه‌شده توسط Rezaei و Knight (۲۰۰۹) است.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق میدان جریان در کانال مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا به‌صورت تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور در معادله ناویه- استوکس متوسط‌گیری شده در عمق، تأثیر همگرایی سیلاب‌دشت‌ها بر روی جریان‌های ثانویه و نیز غیریکنواختی جریان به‌ترتیب به‌وسیله پارامتر  $K$  و شیب خط انرژی ( $S_e$ ) اعمال و جواب تحلیلی معادله استخراج شده است. مهم‌ترین نتایج این تحقیق به‌شرح زیر است:

۱- مقدار  $K$  متناسب با زاویه همگرایی سیلاب‌دشت‌ها نبوده و مقدار آن باید کالیبره شود.

۲- دقت روش تحلیلی ارائه‌شده (Analy) برای پیش‌بینی سرعت متوسط در عمق و تنش برشی در کانال‌های مرکب غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا، نسبت به روش معمول SKM بسیار بیشتری است.

۳- مقایسه میانگین درصد خطای مطلق نقطه‌ای سرعت متوسط در عمق و تنش برشی جداره برآورد شده به‌وسیله این روش تحلیلی با نتایج روش اصلاح‌شده شیونو و نایت (MSKM) (Rezaei و Knight, ۲۰۰۹) نشان‌دهنده دقت بیشتر روش تحلیلی ارائه‌شده است.

- interaction between the flow in the channel of a river and that over its floodplain", *La Houille Blanche*, 7, 1964, 793-801.
- Shiono K, Knight DW, "Two-dimensional analytical solution for a compound channel", *Proc., 3rd Int. Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements*, Tokyo, Japan, July, 1988, 503-510.
- Shiono K, Knight DW, "Mathematical models of flow in two or multi stage straight channels", *Int. Conf. on River Flood Hydraulics*, (Edited by White, W.R.), Hydraulic Research Ltd., Journal Wiley and Sons, 1990, 229-238.
- Shiono K, Knight DW, "Turbulent open channel flows with variable depth across the channel", *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 222, 617-646.
- Tominaga A, Nezu I, "Turbulent structure in compound open channel flow", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1991, 117 (1), 21-41.
- Wark JB, Samuel PG, Ervine DA, "A practical method of estimating velocity and discharge in compound channels", *International Conference on River Flood Hydraulics*, (Edited by White, W.R.), Hydraulic Research Ltd., Journal Wiley and Sons, 1990, 163-172.
- Wormleaton PR, "Determination of discharge in compound channels using the dynamic equation for lateral velocity distribution", *Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics*, Belgrade, Hungary, 1988, 98-103.
- Wormleaton PR, "Floodplain secondary circulation as a mechanism for flow and shear stress redistribution in straight compound channels", In *Coherent Flow structures in Open Channels* [Eds Ashworth, Bennett, Best and McLelland], Chapter 28, John and Wiley, 1996, 581-608.

## EXTENDED ABSTRACT

# Analytical Study of Flow Field in Non-Prismatic Compound Channel with Converging Floodplains Using Modified SKM

Bahram Rezaei\*, Mahbobeh Shamsi

Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 29 January 2019; Accepted: 21 May 2020

### Keywords:

Non-prismatic compound channel, Navier stokes equation, Modified shiono and knight method.

## 1. Introduction

Prediction of flow field in a compound channel is an important task for hydraulic researchers because of the three-dimensional nature of the flow. The complexity of the problem increases, significantly, when floodplains geometry changes from prismatic to non-prismatic form. In non-prismatic compound channels with converging floodplains, the main feature consists of the mass and consequent momentum exchange between the floodplains and the main channel. In the present work, based on the depth-averaged Navier-Stokes equation, an analytical method is proposed and used to predict the depth-averaged velocity and boundary shear stress distribution in non-prismatic compound channels with converging floodplains. In order to consider the effect of the secondary flows in the depth-averaged Navier-Stokes equation, temporal mean velocity components are assumed to be a portion of the depth-averaged velocity. Also, since the flow condition is not uniform, the flume bed slope has been replaced by the energy line slope. The results of the proposed analytical method are then compared with the experimental data, the modified SKM suggested by Rezaei and Knight (MSKM), and the SKM method. The study shows that there is a good agreement between the results of the new analytical method and the experimental data.

## 2. Methodology

Based on the two-dimensional approach, the Lateral Distribution Method (LDM) was developed to study the velocity distribution in prismatic compound channels (see Wormleaton, 1988; Knight et al., 1989; Wark et al., 1990; Wormleaton, 1996). The depth-averaged momentum equation for steady non-uniform flow in a compound channel with non-prismatic floodplains can be written as follows:

$$\rho g S_e H - \rho \frac{f}{8} \sqrt{1+s^2} \bar{U}_d^2 + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} \bar{U}_d \frac{\partial \bar{U}_d}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} [H(\rho \bar{V} \bar{U})_d] \quad (1)$$

Where  $\rho$ =water density,  $g$ =gravitational acceleration,  $S_e$  = energy line slope,  $H$ =flow depth,  $s$ =side slope,  $U_d$  = depth-averaged velocity,  $\lambda$ =dimensionless eddy viscosity,  $f$ =Darcy-Weisbach friction factor, and  $H(\rho \bar{V} \bar{U})_d$  = shear stress due to secondary flow. According to Ervine et al. (2000), it is assumed that temporal mean velocity components ( $(\bar{V} \bar{U})_d$ ) are a fraction of the depth-averaged velocity ( $K \bar{U}_d^2$ ) and therefore

$$\rho g S_e H - \rho \frac{f}{8} \bar{U}_d^2 + \rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \bar{U}_d^2}{\partial y^2} = H \rho K \frac{\partial \bar{U}_d^2}{\partial y} \quad (2)$$

The analytical solution of Equation (2) is as follow:

\* Corresponding Author

E-mail addresses: b.rezaei@basu.ac.ir (Bahram Rezaei), m.shamsi199@gmail.com (Mahbobeh Shamsi).

$$\bar{U}_d = [A_1 e^{\gamma_1 y} + A_2 e^{\gamma_2 y} + \kappa]^{1/2} \tag{3}$$

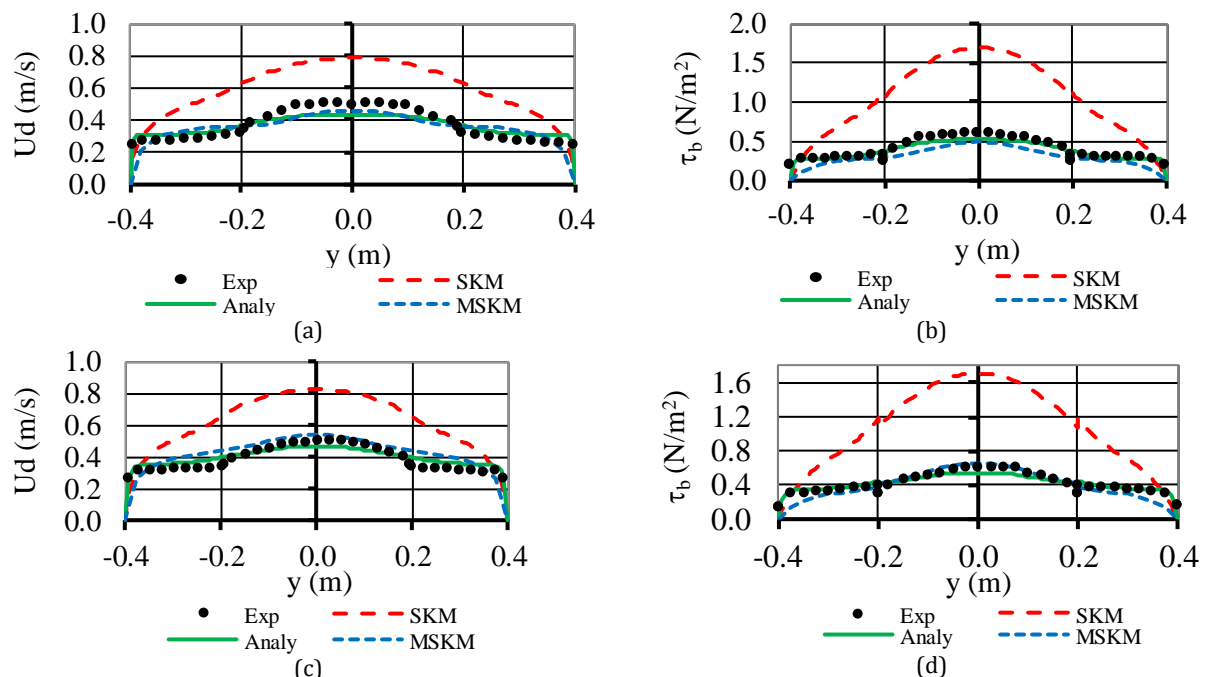
Where  $k=(8gHS_e)/f$ ; and  $\gamma_1$  and  $\gamma_2$  may be written

$$\gamma_1, \gamma_2 = \frac{(-K) \pm \sqrt{(-K)^2 + 2\lambda \left(\frac{f}{8}\right)^{3/2}}}{\sqrt{\frac{f}{8} \cdot \lambda H}} \tag{4}$$

The parameter  $K$  in the proposed model has to be characterized. Equation (3) is applied to a compound channel with converging floodplains. In the initial test runs the value of  $K$  is estimated but successfully refined until it gives the best fit with the depth-averaged velocity data. For example, in the middle of the converging part of the flume, the  $K$  values near the floodplains were chosen 0.08 and 0.04 wall for experimental tests of ONPC2-0 and ONPC6-0, respectively. However, by moving from floodplain walls to the main channel, the  $K$  values would be changed to 0.001 and 0.0005 (for the non-prismatic compound channel with convergence angles of 11.31o and 3.81o).

### 3. Results and discussion

The results of the analytical modeling in the middle of the converging part of the flume for two experimental tests of ONPC2-0-0.4 and ONPC6-0-0.4 are shown in Fig. 1. The figures indicate that to compare with the Modified Shiono and Knight Method (MSKM) (Rezaei and Knight, 2009), there is a good agreement between the experimental data and the depth-averaged velocity and boundary shear stress, modeled by the new Analytical method (Analy). The mean absolute percentage errors (MAPE) calculated for the depth-averaged velocity and boundary shear stress indicate that the accuracy of the proposed analytical model is almost two times those for the Rezaei and Knight (2009) method.



**Fig. 1.** Comparison between depth- Averaged velocity and boundary shear stress modeled using the new Analytical method (Analy), the Modified Shiono and Knight Method (MSKM) (Rezaei and Knight, 2009), the SKM and the experimental data for an experimental test of (a), (b) ONPC2-0-0.4 and (c), (d) ONPC6-0-0.4

### 4. Conclusions

The velocity and boundary shear stress distributions in compound channels with converging floodplains were simulated using a new Analytical method. The results of numerical modeling were then compared with

the Modified Shiono and Knight Method (MSKM) (Rezaei and Knight 2009), the ordinary Shiono and Knight Method (SKM), and the experimental data. The results of modeling indicate that the ordinary (SKM), always, overestimate the depth-averaged velocity and boundary shear stress in the non-prismatic compound channel with converging floodplains. Also, the Mean Absolute Percentage Errors (MAPE) calculated for the velocity and boundary shear stress distributions, show that the accuracy of the proposed analytical method is more than the Modified Shiono and Knight Method (MSKM) (Rezaei and Knight, 2009).

## 5. References

- Ervine DA, Babaeyan- Koopaei K, Sellin RHJ, "Two-Dimensional solution for straight and meandering overbank flows", *Journal of Hydraulic Engineering, IAHR*, 2000, 126 (9), 653-669.
- Knight DW, Shiono K, Pirt J, "Prediction of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow", *Proc. Int. Conf. on Hydraulic and Environmental Modeling of Coastal, Estuarine and River waters*, (Ed. R.A. Falconer, P. Goodwin, R.G.S. Mathew), Gower Technical, University of Bradford, September, Paper 38, 1989, 419-428.
- Rezaei B, Knight DW, "Application of the Shiono and Knight Method in compound channels with non-prismatic floodplains", *Journal of Hydraulic Research*, 2009, 47 (6), 716-726.
- Wark JB, Samuel PG, Ervine DA, "A practical method of estimating velocity and discharge in compound channels", *International Conference on River Flood Hydraulics*, (Edited by White, WR), Hydraulic Research Ltd., *Journal of Wiley and Sons*, 163-172.
- Wormleaton PR, "Determination of discharge in compound channels using the dynamic equation for lateral velocity distribution", *Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraulics*, Belgrade, Hungary, 1988, 98-103.
- Wormleaton PR, "Floodplain secondary circulation as a mechanism for flow and shear stress redistribution in straight compound channels", In *Coherent Flow structures in Open Channels* [Eds Ashworth, Bennett, Best and McLelland], Chapter 28, *Journal of Wiley*, 1996, 581-608.