

## سرعت جریان در کانال مرکب پیچان تحت تأثیر ضریب خمیدگی

محمد نقوی<sup>۱</sup>، میرعلی محمدی<sup>۲\*</sup>، قربان مهتابی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- آب و سازه های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه.

۲- دانشیار مهندسی عمران- هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه.\*

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان.

\* m.mohammadi@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۸/۶/۱۲

### چکیده

رودخانه‌های طبیعی برای تنظیم شیب خط انرژی، به‌ندرت در مسیری مستقیم جریان دارند و معمولاً دارای مسیری انحادار هستند که به آن‌ها پیچان‌رود گفته می‌شود. پس از پیدایش رودخانه‌های پیچان، با گذشت زمان و حرکت جانبی پیچ‌ها، میزان پیشروی قوس بیرونی افزایش یافته و مقدار ضریب خمیدگی یا سینوسی در پلان زیاد می‌شود. درکانال‌های پیچان، میزان انحنا با عدد بی بعدی به نام ضریب خمیدگی تعریف می‌شود که نسبت طول مسیر انحادار کانال اصلی به طول مستقیم سیلاب دشت است. با افزایش مقدار ضریب خمیدگی، شیب، سرعت جریان و ظرفیت انتقال دبی رودخانه کاهش می‌یابد. در نتیجه خطر سیلابی شدن به طور قابل توجهی افزایش یافته و در هنگام بروز سیلاب، سطح آب از مقطع اصلی رودخانه فراتر رفته و وارد دشت‌های سیلابی آن می‌شود. در این حالت با توجه به اندرکنش بین جریان با سرعت بالا در کانال اصلی و جریان کندتر در سیلاب‌دشت‌ها و تبادل اندازه حرکت بین این دو ناحیه، مشخصات جریان دائماً در حال تغییر می‌باشد. در این تحقیق، مشخصات هیدرولیکی جریان شامل توزیع عرضی سرعت متوسط عمقی، پروفیل سطح آب، توزیع سرعت در طول، نسبت سرعت عرضی به طولی در محور مرکزی کانال اصلی، میزان سرعت متوسط و دبی عبوری از کانال اصلی با توجه به تغییر ضریب خمیدگی برای شش نوع کانال با مقادیر سینوسی مختلف به صورت عددی بررسی شده است. برای بررسی اثر ضریب خمیدگی کانال مرکب پیچان رود روی مشخصات هیدرولیکی جریان، از نرم‌افزار FLOW3D استفاده شده است و مدل آشفتگی این نرم‌افزار نیز طوری انتخاب شد که هماهنگی بهتری با داده‌های آزمایشگاهی داشته باشد. برای این منظور، از دو مدل آشفتگی پرکاربرد RNG و k-ε استفاده شده و عملکرد این دو مدل آشفتگی در شبیه‌سازی مشخصه هیدرولیکی جریان بررسی و مشخص شد که مدل آشفتگی RNG دارای دقت بیشتری است. در ادامه، این مدل به عنوان مدل آشفتگی نهایی برای شبیه‌سازی عددی معرفی شد. در نهایت با بررسی کانال مرکب پیچان رود تحت تأثیر ضریب خمیدگی مختلف مشخص شد که با افزایش مقدار ضریب خمیدگی کانال مرکب از ۱ به ۱/۶۴۱، مقدار سرعت متوسط مقطع اصلی کانال مرکب پیچان به طور میانگین ۵۴٪ و میزان دبی عبوری از مقطع اصلی کانال به طور متوسط ۳۸٪ کاهش می‌یابد. با افزایش میزان ضریب خمیدگی، مقدار بیشینه سرعت متوسط عمقی مقطع اصلی کانال از ۰/۵۵ به ۰/۳۸ متر بر ثانیه کاهش و مقدار بیشینه ارتفاع سطح آب از ۰/۳۰۵ به ۰/۳۳۲ متر در قوس بیرونی مقطع CS1 افزایش می‌یابد. افزایش مقدار ضریب خمیدگی باعث می‌شود نسبت سرعت عرضی به سرعت طولی در محور مرکزی کانال اصلی افزایش یافته به طوری که مقدار آن در بحرانی‌ترین حالت از صفر به ۰/۴ می‌رسد. با افزایش ضریب خمیدگی، مقدار سرعت طولی حداکثر به سمت سیلاب‌دشت سمت راست (خم داخلی) حرکت کرده و از مقدار آن کاسته می‌شود. به طوری که با افزایش ضریب خمیدگی از ۱ به ۱/۶۴۱، مقدار حداکثر سرعت طولی از ۰/۵۵ به ۰/۴۲ متر بر ثانیه کاهش یافته و موقعیت آن از مرکز کانال اصلی به سمت خم داخلی در بالای عمق لبریز کانال اصلی حرکت می‌کند.

**واژگان کلیدی:** کانال مرکب، پیچان‌رود، ضریب خمیدگی، سرعت متوسط عمقی، FLOW3D.

## ۱- مقدمه

در طبیعت بیشتر رودخانه‌ها در محدوده کوتاهی از مسیر خود مستقیم بوده و معمولاً با کوچکترین بی‌نظمی و آشفتگی در جریان، از مسیر خود منحرف شده و به صورت پیچان در می‌آیند. پیچان رودها شامل یک سری پیچ و خم‌های متناوب هستند که توسط بازه‌های مستقیم کوتاه به یکدیگر می‌پیوندند. این نوع رودخانه‌ها دارای شیب کم بوده و در هنگام بروز سیلاب، سطح آب از مقطع اصلی آن فراتر رفته و وارد سیلاب‌دشت‌های اطراف آن می‌شود. در این حالت مقطع جریان عبوری به صورت یک کانال مرکب در می‌آید. جریان در کانال‌های مرکب با جریان در کانال‌های ساده متفاوت است چرا که اختلاف سرعت بین ناحیه سیلاب‌دشت و کانال اصلی باعث انتقال اندازه حرکت و ایجاد آشفتگی بین این دو ناحیه شده و دبی کانال را کاهش می‌دهد. با توجه به ورود، خروج و عبور جریان سیلاب‌دشت‌ها به کانال اصلی در پیچان‌رودها، این پیچیدگی در کانال‌های مرکب پیچان دوچندان می‌شود.

تاکنون پژوهش‌هایی در مورد کانال‌های مرکب انجام شده که به عنوان نمونه می‌توان به مطالعات تویز و سوکی (۱۹۶۷) در مورد هیدرولیک جریان کانال مرکب پیچان‌رود و اتلاف انرژی مشاهده شده در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت اشاره کرد [1]. همچنین نایت و همکاران (۱۹۸۳) با بررسی مشخصه‌های اندرکنش کانال اصلی و سیلاب‌دشت در کانال‌هایی مرکب به این نتیجه رسیدند که جریان در ناحیه‌های کم عمق باعث شتاب منفی جانبی در کانال اصلی می‌شود [2]. کیلی سرعت، دبی، شدت آشفتگی و جریان‌های ثانویه در مقاطع مرکب مستقیم و پیچان را بررسی کرد [3]. اروین و همکاران نیز اثر پارامترهایی مانند ضریب خمیدگی، هندسه کانال، زبری بستر، عمق جریان و شیب کانال را بررسی کردند [4]. شیونو و موتو با اندازه‌گیری آشفتگی و جریان ثانویه کانال پیچان، سازوکار جریان در کانال مرکب پیچان را بررسی کردند [5]. شیونو و همکاران اتلاف انرژی در کانال مرکب پیچان را بررسی کردند [6]. در همان سال مجدداً شیونو و همکاران منحنی دبی-اشل، شیب طولی و ضریب خمیدگی را در کانال مرکب پیچان را ارزیابی کرده، و مشخص شد که شیب طولی و

ضریب خمیدگی به طور قابل توجهی روی دبی جریان موثر است [7]. اسپونر و شیونو، مدل ریاضی دوبعدی برای پیش‌بینی توزیع عرضی سرعت و تنش برشی بستر در مقاطع مرکب پیچان با صرف نظر کردن اثر انرژی ناشی از نیروی گریز از مرکز و جریان ثانویه ارائه دادند [8]. ورملیتون و همکاران با بررسی ساختار جریان در کانال با بستر متحرک به این نتیجه رسیدند که دانه‌بندی مصالح و پروفیل بستر روی ساختار جریان موثر است [9]. دمارچیز و همکاران (۲۰۰۸) اثر پارامترهای هندسی را روی ظرفیت انتقال کانال مرکب پیچان مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل عددی نشان داد که میزان ضریب خمیدگی پارامتر اصلی است که باید در فرمول‌های تجربی برای ارزیابی ظرفیت انتقال کانال‌ها مورد توجه قرار گیرد [10]. رامشوران و همکاران با بررسی مدل فیزیکی رودخانه بلک واتر و مطالعه روی سیلاب‌دشت‌های افقی و شیب‌دار و کانال‌های با ضریب خمیدگی مختلف، توزیع عرضی سرعت و تنش برشی بستر را ارزیابی کردند [11]. شیونو و همکاران مشخصات جریان و فرم بستر در کانال‌های مرکب پیچان با بستر متحرک و بستر ثابت را بررسی کردند [12]. لیو و همکاران با ارائه یک مدل تحلیلی، توزیع سرعت متوسط عمقی را در طول خم کانال مرکب پیچان مورد بررسی قرار دادند [13]. همچنین مرا و همکاران آشفتگی ناهم‌سان در کانال مرکب پیچان با شرایط مختلف استغراق را مورد بررسی قرار دادند [14]. لیو و همکاران روشی را برای ارزیابی دبی در کانال مرکب پیچان ارائه دادند. آنها همچنین در این سال ویژگی‌های جریان در کانال مرکب پیچان را تحت اثر سیلاب‌دشت پوشیده با چمن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که وجود چمن در سیلاب‌دشت روی انتقال کانال تأثیر قابل توجهی دارد و میزان دبی عبوری آن را نسبت به حالت کانال صاف ۳۰ درصد کاهش می‌دهد [15, 16]. شان و همکاران با ارائه یک مدل تحلیلی به برآورد منحنی دبی-اشل در کانال مرکب پیچان با پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر مستغرق پرداختند [17]. سعید گلانیک و محمدی با بررسی عددی مشخصات هیدرولیکی جریان در کانال مرکب پیچان و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی هاردویک نشان دادند که نرم افزار

شکل ۱. طرح شماتیک کانال‌های استفاده شده در این پژوهش با مقادیر ضریب خمیدگی مختلف

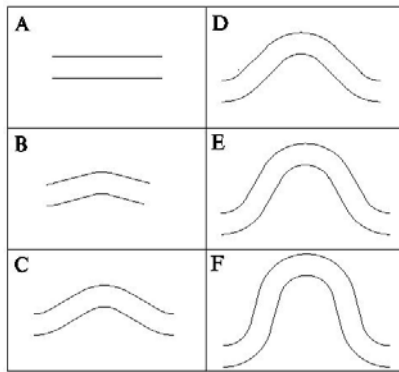


Fig. 1. The schematic design of the channels used in this research with a different Sinuosity values.

به عنوان نمونه پلان مشخصات هندسی کانال E در شکل (۲) نشان داده شده و مطابق این شکل شرایط جریان در هفت مقطع مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه دبی جریان ورودی کلیه کانال‌ها ۰/۱۸۹ مترمکعب بر ثانیه، عمق و عرض کانال اصلی مستطیلی ۰/۱۴ و ۰/۷ متر، عمق جریان ورودی به کانال مرکب و عرض آن ۰/۲۵۵ و ۴ متر است. لازم به ذکر است که نرم افزار FLOW3D فاکتور  $K_s$  را به عنوان زبری معادل برای مشخصه ناهمواری بستر به صورت مقیاس طولی در نظر می‌گیرد. در این پژوهش با توجه به ضریب زبری مانینگ ارائه شده در آزمایش‌های لیو و همکاران که در بخش درستی آزمایشی از آن استفاده شده و با توجه به معادله Ackers (1991) که به صورت رابطه ۱ ارائه شده است، مقدار  $k_s$  بدست آمده، در شبیه‌سازی‌ها به عنوان ضخامت زبری بستر استفاده شد.

$$k_s = (8.25n\sqrt{g})^v \quad (1)$$

در FLOW3D دقت بالایی در مدل‌سازی کانال مرکب پیچان دارد [18]. شان و همکاران به پیش‌بینی زاویه مسیر جریان دو بعدی متوسط در امتداد خم پیچان در کانال‌های مرکب پیچان‌رودی پرداختند [19]. مونچو-استیو و همکاران با مطالعه عددی، ساختار جریان پیچیده در یک کانال مرکب پیچان را مورد بررسی قرار دادند [20]. مطالعات میدانی و آزمایشگاهی در کانال‌های مرکب، با توجه به مشکلات ثبت داده‌های لازم در شرایط سیلابی، پرهزینه و زمان‌بر است. بنابراین استفاده از شبیه‌سازی عددی به علت قابلیت استخراج دقیق پارامترهای هیدرولیکی، توانایی بالا و سهولت کار توصیه می‌شود. در زمینه شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در سازه‌های هیدرولیکی با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D مطالعات وسیعی انجام شده است که می‌توان به مطالعات موسسه واتما [21]، گونزالز و بومباردلی [22] و آخریا و همکاران [23] اشاره کرد.

در این پژوهش با توجه به مطالعات انجام شده، پروفیل عرضی سرعت متوسط در عمق، پروفیل سطح آزاد آب، توزیع سرعت طولی، نسبت سرعت عرضی به طولی در محور مرکزی کانال اصلی، میزان سرعت متوسط و دبی عبوری از کانال اصلی در طول خم کانال مرکب پیچان با توجه به تغییر ضریب خمیدگی کانال با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D محاسبه می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای بررسی عددی تاثیر مقدار ضریب خمیدگی کانال‌های مرکب پیچان روی شرایط هیدرولیکی جریان، شش نوع کانال با ضریب خمیدگی مختلف مطابق شکل (۱) و جدول (۱) مدل‌سازی شده است.

جدول ۱. پارامترهای هندسی برای شش نوع کانال A تا F.

Case	Meandering belt width (Bm)(m)	Wave length (m)	Inner radius (m)	Outer radius (m)	Cross-over length (m)	Sinuosity (S)	Cross-over angle (θ)
A	0.7	-	0.9	1.6	1.2	1	0
B	1.1	3.61	0.9	1.6	1.2	1.026	15
C	1.63	4.58	0.9	1.6	1.2	1.096	30
D	2.28	5.23	0.9	1.6	1.2	1.209	45
E	2.99	5.53	0.9	1.6	1.2	1.381	60
F	3.71	5.45	0.9	1.6	1.2	1.641	75

Table 1. Geometric parameters for six type of channels (A-F)

است. FSOR نرخ زمانی تغییرات جزء حجمی سیال ناشی از منبع جرم در یک سلول محاسباتی است چنانچه یک سلول محاسباتی مشخص پر از آب باشد  $F=1$  خواهد شد. اگر  $F=0$  سلول مورد نظر خالی است و اگر  $0 < F < 1$ ، سلول مورد نظر حاوی هر دو فاز آب و هوا است.

## ۲-۲- شبکه بندی میدان جریان و شرایط مرزی

شبکه حل در این مدل متشکل از سلولهای مکعبی است. برنامه FLOW3D فقط قابلیت تولید شبکههای منظم (مکعبی) را دارد پس با توجه به منحنی بودن میدان جریان در نواحی دیواره کانال اصلی کانال مرکب پیچان رودی و رفتار خاص جریان در محل اتصال کانال اصلی به سیلاب دشت و به منظور افزایش دقت در نتایج حاصل، باید از شبکه بندی ریزتری استفاده شود. ساختن شبکه مناسب برای میدان حل معادلات، دقت محاسبات، همگرایی و زمان محاسبات را تحت تاثیر قرار می دهد. در کلیه مدل های عددی صورت گرفته، برای حصول نتایج درست و منطقی و کاهش خطا و زمان شبیه سازی، طبق راهنمای برنامه FLOW3D ابعاد شبکه طوری تعیین شد که نسبت اندازه دو سلول مجاور و نسبت شکل تا حد ممکن نزدیک به ۱ باشد و حداکثر این دو پارامتر به ترتیب از ۱/۲۵ و ۳ تجاوز نکند.

در این پژوهش پس از بررسی شبکه بندی های مختلف، ریز کردن شبکه تا رسیدن به انحنای مناسب در کانال اصلی پیچان رود و نزدیک شدن به نتایج آزمایشگاهی، با سعی و خطاهای متعددی انجام شد که در نهایت حدود هشتصد هزار سلول برای مدل سازی انتخاب شد. شرایط مرزی اعمال شده برای مدل عددی نیز به گونه ای انتخاب شد که با شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی هماهنگی داشته باشد. بنابراین با توجه به داشتن دبی و عمق جریان ورودی، برای حل معادلات حاکم بر میدان جریان، از مقدار دبی و عمق جریان مشخص در مقطع ورودی مدل عددی استفاده شد. این شرایط مرزی در نرم افزار FLOW3D معادل شرایط مرزی Volume Flow Rate (نرخ جریان حجمی) است. برای شرایط مرزی پایین دست در شبیه سازی حاضر از شرط مرزی Outflow (خروجی) نرم افزار استفاده شد. در این شرط مرزی نیاز به اعمال پارامتر

سرعت جریان در کانال مرکب پیچان تحت تاثیر ضریب خمیدگی

شکل ۲. پلان جزئیات هندسی و مقاطع مورد سنجش (کانال E).

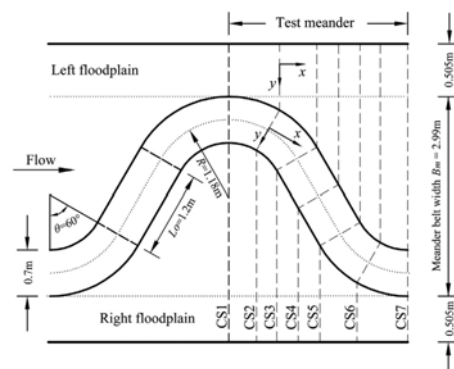


Fig. 2. Plan details of geometry and measuring sections (Case E).

## ۲-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر حرکت سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتم که به معادلات ناویراستوکس معروف هستند و معادلات پایه استفاده شده در مدل FLOW3D هستند. برای جریان آشفتنه تراکم ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت این معادلات به صورت روابط ۲ و ۳ معرفی می شوند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i \quad (3)$$

که در آن  $x_i$  و  $x_j$  محورهای مختصات در سیستم کارتزین، زمان  $t$ ، چگالی سیال،  $\bar{p}$  فشار متوسط،  $U_i$  و  $U_j$  سرعت و  $u_i$  و  $u_j$  تانسور تنش رینولدز هستند. همچنین در این مطالعه عددی، برای پیش بینی تغییرات سطح آزاد جریان از روش حجم سیال VOF استفاده شده است. پروفیل سطح آزاد جریان در روش (VOF) با تعریف تابع  $F(x, y, z, t)$  که بیانگر نسبت حجم اشغال شده توسط سیال به کل حجم است، از معادلات ۴ و ۵ بدست می آید.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\partial}{\partial z} (F A_z W) + \xi \left( \frac{\partial x}{\partial t} \right) \right] = FDIF + FSOR \quad (4)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\partial}{\partial z} (U_F A_z) \right] + \xi \left( \frac{\partial x}{\partial t} \right) \quad (5)$$

در این روابط  $u, v, w$  مولفه های سرعت،  $A_x, A_y, A_z$  جزء سطحی جریان در جهت  $x, y, z$  و  $V_F$  جزء حجمی جریان هستند. در سیستم مختصات کارتزین  $R$  برابر بوده و  $\xi$  صفر

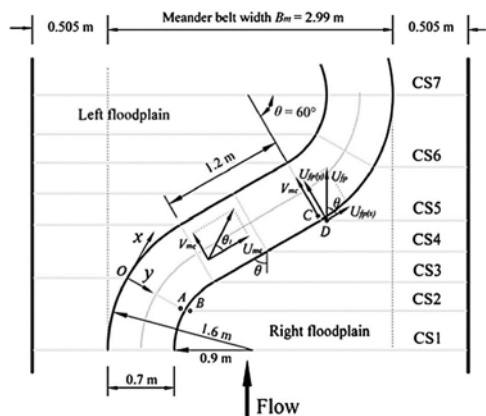


Fig. 4. A photographic plan view of the meandering compound channel [13 & 16].

با توجه به بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان در این پژوهش، داده‌های مربوط به دبی کانال اصلی، نسبت سرعت عرضی به سرعت طولی در محور مرکزی کانال اصلی برای سرعت متوسط عمقی در مقطع کانال اصلی برای درستی‌آزمایی استفاده شده است. در تمامی نمودارهای استخراج شده در این پژوهش نمای دید مقاطع بر خلاف جهت حرکت جریان است. در این پژوهش نتایج مدل عددی FLOW3D با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و عملکرد دو مدل آشفتگی پرکاربرد RNG و k-ε در شبیه‌سازی مشخصات هیدرولیکی جریان بررسی شد که نتایج آن در شکل (۵ و ۶) نشان داده شده است.

شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای نسبت سرعت عرضی به طولی در مقاطع CS1 و CS7.

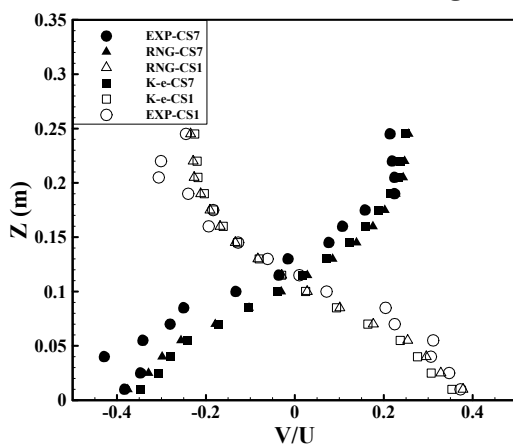


Fig. 5. Comparison between experimental and numerical results for the ratio of transverse velocity to streamwise velocity ( $V/U$ ) at CS1,7.

هیدرولیکی خاصی نیست. برای اعمال شرایط مرزی در دیوارهای جانبی و کف کانال، از شرط مرزی wall (دیواره) استفاده شد. کل سطح فوقانی میدان جریان نیز در این مدل‌سازی به صورت شرایط مرزی Symmetry (تقارن) تعریف شد. شبکه‌بندی میدان جریان و شرایط مرزی اعمال شده به مدل عددی در شکل (۳) قابل مشاهده است.

۰/۱۸۹ مترمکعب بر ثانیه، عمق جریان ۰/۲۵۵ متر و ارتفاع کانال اصلی ۰/۱۴ متر است [13, 15, 16]. در پژوهش لیو و همکاران، مشخصات هیدرولیکی جریان فقط در کانال با سینوسی نوع E بررسی شده است. پلان مشخصات هندسی کانال استفاده شده برای درستی‌آزمایی و محل اندازه‌گیری داده‌ها در این آزمایش در شکل (۴) نشان داده شده است.

### ۲-۳- درستی‌آزمایی نتایج

برای درستی‌آزمایی و کنترل نتایج استخراج شده در این پژوهش، از داده‌های آزمایشگاهی لیو و همکاران استفاده شده است. این آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۳۵ متر، عرض ۴ متر و عمق ۱ متر در آزمایشگاه هیدرولیک و مهندسی رودخانه دانشگاه سیچوان چین انجام شده است. در این کانال آزمایشگاهی دبی عبوری کل مقطع برای مدل‌سازی عددی، ضخامت کف و جداره کانال ۵/۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.

شکل ۳. شبکه بندی میدان جریان و شرایط مرزی تعریف شده برای مدل عددی

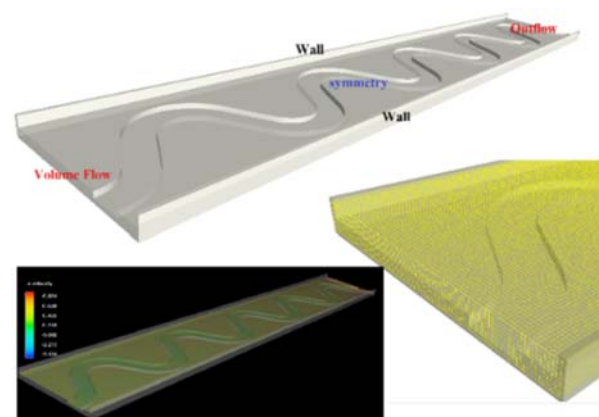


Fig. 3. The flow field grid and boundary conditions defined for numerical model

شکل ۴. نمایی از هندسه کانال مرکب پیچان.

سرعت متوسط عمقی استفاده شده است. در این روابط  $X_i$  و  $Y_i$  مقادیر داده های عددی و آزمایشگاهی،  $N$  تعداد داده ها و  $M$  میانگین داده ها است. با توجه به رابطه ۶ و ۷ مقادیر RMSE و NRMSE برای مقدار سرعت متوسط عمقی کانال اصلی در مقطع CS1 به ترتیب ۰/۲۶ و ۸/۵۸ درصد است که بیانگر دقت بالای محاسبات عددی در اندازه گیری سرعت متوسط عمقی می باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2} \quad (6)$$

$$NRMSE = \left( \frac{RMSE}{M} \right) \times 100 \quad (7)$$

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- جریان های ثانویه و نسبت سرعت عرضی به طولی در محور مرکزی کانال اصلی

در یک کانال مرکب پیچان با حرکت در طول خم، زاویه بین راستای جریان کانال اصلی و راستای سیلاب دشت مستقیم تغییر می کند (به عنوان نمونه در کانال مرکب پیچان E با ضریب خمیدگی ۱/۳۸۱ زاویه  $\theta$  در CS1 برابر صفر درجه و در CS3 برابر ۶۰ درجه است). بنابراین جریان ثانویه در کانال اصلی پیچان رودها تحت تاثیر دو جزء جریان است. جریان ناشی نیروی گریز از مرکز ( $V_1$ ) و جریان ناشی از سیلاب دشت بالادست ( $V_2$ )، که تاثیر توأم این دو جزء جریان در شکل (۸) نشان داده شده است. نسبت سرعت عرضی به سرعت طولی نشان دهنده شدت جریان ثانویه در کانال های پیچان است. برای این منظور در هر ۶ نوع کانال با مقدار سینوسیته مختلف، نسبت سرعت عرضی به سرعت طولی ( $V/U$ ) در محور عمود بر مرکز کانال اصلی در مقاطع CS1 و CS7 که دارای بیشترین انحنا در هر مقدار سینوسیته می باشد محاسبه شده است. شکل های (۹ و ۱۰) تغییر مقدار  $V/U$  در محور مرکزی کانال اصلی با توجه به تغییرات مقدار سینوسیته را نشان می دهد. مطابق این دو شکل، توزیع قرینه سرعت در مقاطع CS1 و CS7 به علت جریان متقارن در کانال مرکب پیچان مشاهده می شود. در مقطع CS1 نسبت  $V/U$  برای کانال مرکب مستقیم ( $S=1$ ) با توجه به عدم وجود نیروی گریز از مرکز و ناچیز بودن سرعت عرضی تقریباً صفر است. با افزایش مقدار سینوسیته کانال، مقدار  $V/U$  افزایش یافته و در نهایت به بیشترین مقدار خود در

سرعت جریان در کانال مرکب پیچان تحت تاثیر ضریب خمیدگی شکل ۶. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای نسبت دبی کانال اصلی به دبی کل در طول نیمی از مسیر پیچان رود.

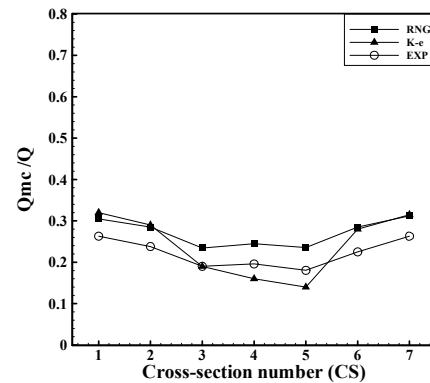


Fig. 6. Comparison between experimental and numerical results for the ratio of main channel discharge ( $Q_{mc}$ ) and total discharge ( $Q$ ) along half a meander.

همان گونه که در شکل (۵ و ۶) مشخص شده، مدل آشفتگی RNG دقت بهتری نسبت به مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  داشته، بنابراین این مدل به عنوان مدل آشفتگی نهایی برای شبیه سازی عددی معرفی شد.

با توجه به انتخاب مدل آشفتگی RNG برای مدل سازی عددی، در ادامه برای بررسی بیشتر درستی نتایج عددی از داده های آزمایشگاهی سرعت متوسط عمقی کانال اصلی مقطع CS1 مطابق شکل (۷) استفاده شده است.

شکل ۷. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1.

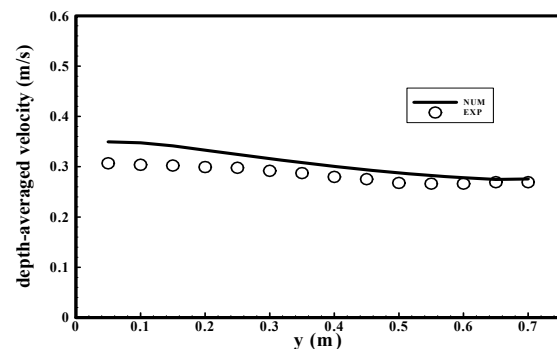


Fig.7. Comparison between experimental and numerical results for Depth-averaged velocity at CS1.

به منظور بررسی میزان دقت نتایج محاسبات مدل عددی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی از شاخص های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) مطابق رابطه ۶ و ۷، برای مقدار



شکل ۱۰. نسبت سرعت عرضی به سرعت طولی ( $V/U$ ) در خط مرکزی کانال اصلی پیچان در مقطع CS7 برای ۶ مورد کانال A تا F.

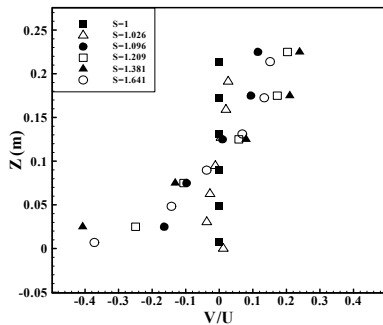


Fig. 10. The ratio of transverse velocity to streamwise velocity ( $V/U$ ) in the centerline of meandering main channel at CS7 for six cases (A-F).

### ۳-۲- توزیع سرعت طولی در کانال اصلی

در شکل (۱۱) توزیع سرعت طولی در مقطع CS1 با توجه به تغییر مقدار ضریب خمیدگی نشان داده شده است. در تمامی موارد بیشینه مقدار سرعت طولی در بالای سطح عمق لبریز کانال (بالای عمق ۱۴ سانتی متر) است.

شکل ۱۱. توزیع سرعت طولی ( $U$ ) در مقطع CS1 کانال اصلی پیچان برای ۶ مورد کانال A تا F.

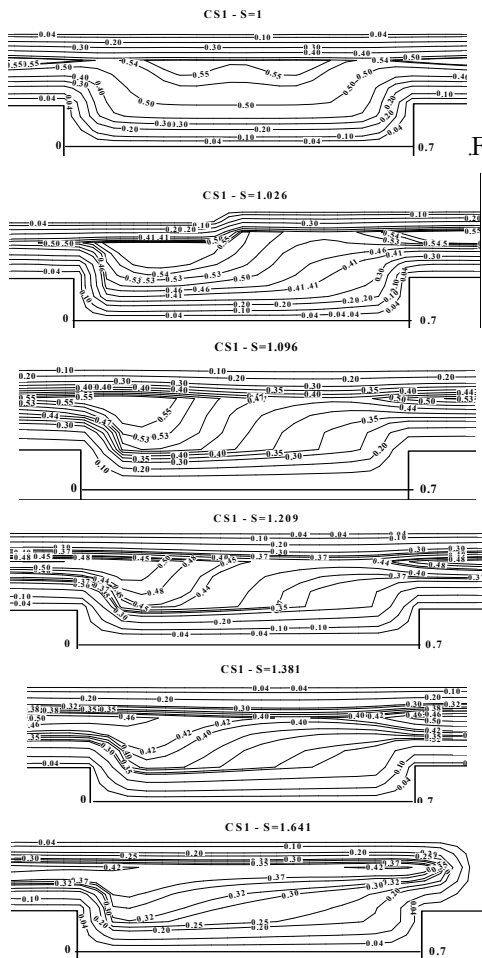


Fig. 11. Streamwise velocity ( $U$ ) distributions in the meandering main channel at CS1 for six cases (A-F).

محدوده ۰/۲۵- تا ۰/۴ می رسد. در مقطع CS7 نیز مقدار  $V/U$  با توجه به افزایش مقدار ضریب خمیدگی و تغییر جهت جریان در طول کانال پیچان به محدوده ۰/۴- تا ۰/۲۴ می رسد.

شکل ۸ سازوکار تولید جریان ثانویه در کانال اصلی پیچان رود و توزیع قائم سرعت های عرضی در CS2 و CS6 [13].

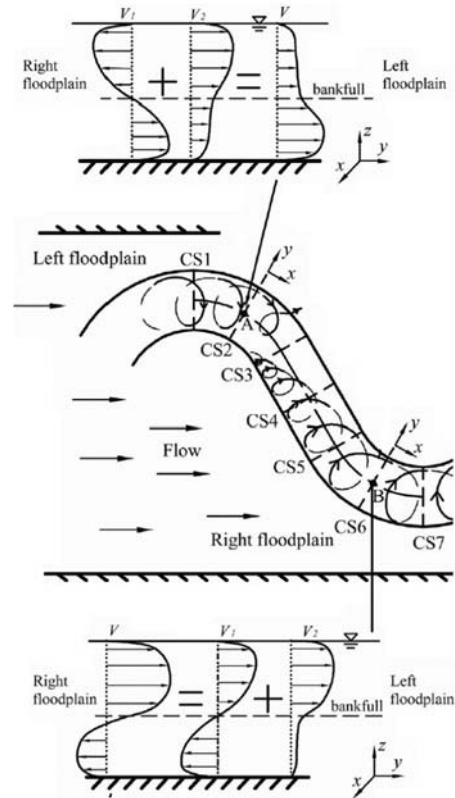


Fig. 8. Secondary flow generation mechanism in the meandering main channel and vertical distributions of transverse velocities at CS2,6 [13].

شکل ۹. نسبت سرعت عرضی به سرعت طولی ( $v/u$ ) در خط مرکزی کانال اصلی پیچان در مقطع CS1 برای ۶ مورد کانال A تا F.

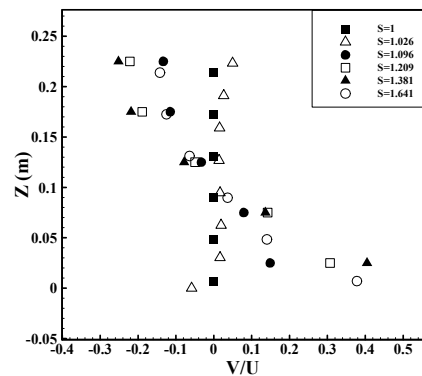


Fig.9. The ratio of transverse velocity to stream-wise velocity ( $V/U$ ) in the centerline of meandering main channel at CS1 for six cases (A-F).

شکل ۱۲. پروفیل سرعت متوسط عمقی در مقطع کانال اصلی پیچان برای ۶ مورد کانال A تا F.

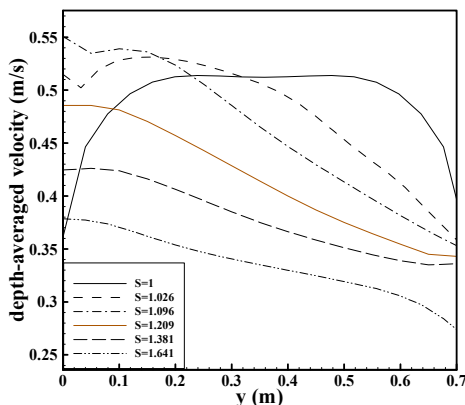


Fig. 12. Depth-averaged velocity profiles in a meandering main channel at CS1 for six cases (A-F).

شکل ۱۳. پروفیل سرعت متوسط عمقی در مقطع کانال اصلی پیچان برای ۶ مورد کانال A تا F.

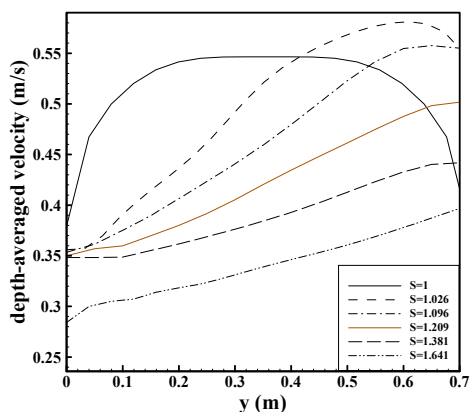


Fig. 13. Depth-averaged velocity profiles in a meandering main channel at CS7 for six cases (A-F).

در این نمودارها مقدار بیشینه سرعت متوسط عمقی با افزایش مقدار ضریب خمیدگی، از ۰/۵۵ به ۰/۳۸ متر بر ثانیه در خم داخلی کاهش می‌یابد. توزیع قرینه در این دو مقطع به علت جریان متقارن در کانال مرکب پیچان است. در ادامه سرعت متوسط کلی در کانال اصلی پیچان در هریک از مقاطع هفتگانه CS1 تا CS7 با توجه به تغییر مقدار ضریب خمیدگی محاسبه می‌شود. در شکل (۱۴) این تغییرات برای ۷ مقطع از طول خم پیچان و در ۶ ضریب خمیدگی مختلف نشان داده شده است.

سرعت جریان در کانال مرکب پیچان تحت تأثیر ضریب خمیدگی

در کانال مرکب مستقیم ( $S=1$ ) بیشینه مقدار سرعت طولی در مرکز کانال اصلی (محدوده ۰/۲ الی ۰/۵ متر از کانال به عرض ۰/۷ متر) و در عمق حدود ۰/۲ متری رخ می‌دهد. با افزایش میزان انحنا و مقدار ضریب خمیدگی، مقدار سرعت طولی حداکثر به سمت سیلاب‌دشت سمت راست (خم داخلی) حرکت کرده و از مقدار آن کاسته می‌شود به طوری که با افزایش مقدار ضریب خمیدگی از ۱ به ۱/۶۴۱، مقدار بیشینه سرعت طولی از ۰/۵۵ به ۰/۴۲ متر بر ثانیه (۲۴ درصد کاهش) تغییر کرده و موقعیت آن از مرکز کانال اصلی به سمت خم داخلی و در عمق ۰/۲ متر حرکت می‌کند.

### ۳-۳- تغییرات سرعت متوسط عمقی و سرعت متوسط کلی مقاطع مختلف کانال اصلی

با افزایش شعاع انحنا و نیروی گریز از مرکز در خم خارجی کانال مرکب پیچان، تراکم خطوط جریان افزایش یافته و در نتیجه مقاومت جریان افزایش می‌یابد. با افزایش مقاومت جریان در خم خارجی، مقدار سرعت متوسط عمقی کاهش پیدا می‌کند. با توجه به توزیع سرعت طولی مقطع CS1 در شکل (۱۱) بیشینه مقدار سرعت طولی در کانال مرکب مستقیم در مرکز کانال رخ داده و با افزایش ضریب خمیدگی به سمت خم داخلی حرکت کرده و کاهش می‌یابد. بنابراین حداکثر مقدار سرعت متوسط عمقی در خم داخلی با افزایش مقدار ضریب خمیدگی و شعاع انحنا کاهش می‌یابد. شکل‌های (۱۲ و ۱۳) پروفیل عرضی سرعت متوسط عمقی را با توجه به تغییر مقدار ضریب خمیدگی کانال مرکب پیچان در مقاطع CS1 و CS7 نشان می‌دهند.



شکل ۱۵. پروفیل سطح آزاد آب در مقطع CS1 کانال اصلی پیچان برای ۶

مورد کانال A تا F

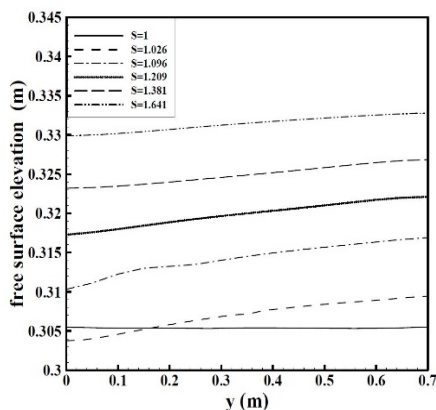


Fig. 15. free surface elevation Profile in the meandering main channel at CS1 for six cases (A-F).

شکل ۱۶. پروفیل سطح آزاد آب در مقطع CS7 کانال اصلی پیچان برای ۶

مورد کانال A تا F.

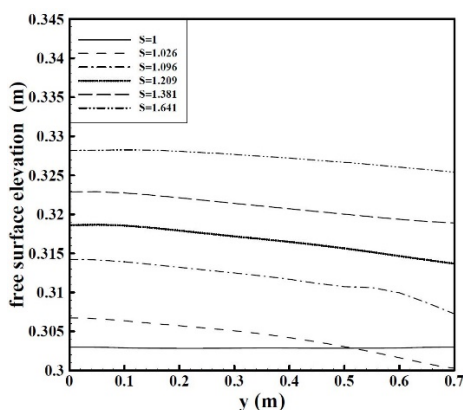


Fig. 16. free surface elevation Profile in the meandering main channel at CS7 for six cases (A-F).

### ۳-۵- میزان دبی عبوری از کانال اصلی برای مقاطع مختلف

در ادامه میزان دبی عبوری از هر مقطع کانال اصلی با توجه به تغییر میزان ضریب خمیدگی کانال مرکب پیچان محاسبه شده است. در شکل (۱۷) این میزان تغییرات بر اساس نسبت دبی عبوری از کانال اصلی به دبی کل نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۷) دیده می‌شود با افزایش مقدار ضریب خمیدگی از ۱ به ۱/۶۴۱، مقدار دبی عبوری از کانال اصلی کاهش می‌یابد. در مقاطع میانی (CS2-CS6)، جریان عرضی سیلاب‌دشت بالادست در کانال اصلی پیچان رود غرق

شکل ۱۴. تغییرات سرعت متوسط مقاطع CS1-7 در کانال اصلی برای ۶

مورد کانال A تا F

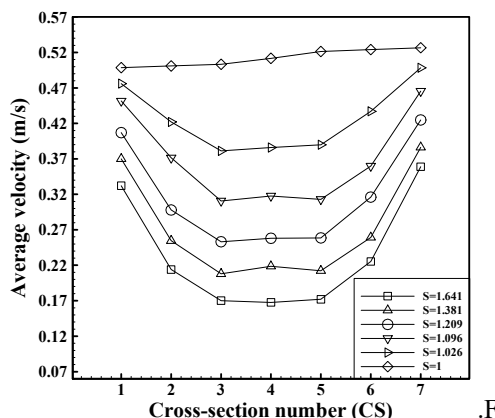


Fig. 14. Average velocity variations in a meandering main channel at CS1-CS7 for six cases (A-F).

همان‌طور که در نمودارها مشخص است با افزایش ضریب خمیدگی، مقدار سرعت متوسط کانال اصلی کاهش می‌یابد به طوری که در بحرانی‌ترین حالت مقدار سرعت متوسط کانال اصلی در مقطع CS4 از ۰/۵۱ به ۰/۱۶ متر بر ثانیه می‌رسد. همچنین با میانگین‌گیری سرعت متوسط مقاطع مختلف در هر مقدار ضریب خمیدگی، مشاهده می‌شود که مقدار سرعت متوسط مقطع کانال اصلی با افزایش مقدار ضریب خمیدگی به طور میانگین ۵۴ درصد کاهش می‌یابد.

### ۳-۴- پروفیل سطح آزاد آب

همان‌طور که در بخش‌های قبلی نشان داده شد، در یک کانال مرکب پیچان هرچه به سمت خم خارجی حرکت شود، با افزایش شعاع انحنا و نیروی گریز از مرکز در خم خارجی، بر تراکم خطوط جریان و در نتیجه مقاومت جریان افزوده می‌شود. بنابراین مقدار سرعت متوسط عمقی کاهش یافته و ارتفاع سطح آزاد آب افزایش می‌یابد. شکل‌های (۱۵ و ۱۶) تغییر پروفیل سطح آزاد آب را با تغییر مقدار ضریب خمیدگی در مقطع CS1 و CS7 نشان می‌دهد. در این نمودارها مقدار بیشینه ارتفاع سطح آزاد آب با افزایش مقدار سینوسیته، از ۰/۳۰۵ به ۰/۳۳۲ متر (۹٪ افزایش) در خم خارجی مقطع CS1 و از ۰/۳۰۳ به ۰/۳۲۸ متر (۸٪ افزایش) در خم خارجی مقطع CS7 تغییر می‌کند. ارتفاع سطح آزاد آب با توجه به ضخامت ۵/۵ سانتیمتری کف کانال محاسبه شده است.

درحالی که کوچکترین دبی کانال اصلی بیشتر در مقطع میاتی رخ می دهد (CS4) و این اختلاف بین مقادیر مقطع ابتدا، انتها و مقطع میانی با کاهش مقدار ضریب خمیدگی و زاویه  $\theta$  به حداقل مقدار خود می رسد. در ادامه میزان دبی عبوری متوسط گیری شده در مقاطع کانال اصلی ( $Q_{mc}$ ) و سیلاب دشت ( $Q_{fp}$ ) در جدول (۲) برای ۶ مقدار ضریب خمیدگی مختلف نشان داده شده است. در صد نشان داده شده در پراختز، نسبت دبی کانال اصلی ( $Q_{mc}$ ) یا دبی سیلاب دشت ( $Q_{fp}$ ) به دبی کل عبوری  $Q$  است. همان گونه که در جدول (۲) نشان داده شده است، با افزایش مقدار ضریب خمیدگی از ۱ به ۱/۶۴۱، میزان دبی متوسط عبوری از مقطع کانال اصلی به دبی کل، از ۰/۳۷ به ۰/۲۳ کاهش می یابد که می توان گفت این مقدار دبی ۳۸ درصد کاهش یافته است.

سرعت جریان در کانال مرکب پیچان تحت تأثیر ضریب خمیدگی شده و با جریان این کانال برخورد می کند. این فرایند، انرژی جنبشی اضافی را با تولید تنش برشی عمودی

شکل ۱۷. نسبت دبی کانال اصلی به دبی کل در طول نیمی از مسیر پیچان رود.

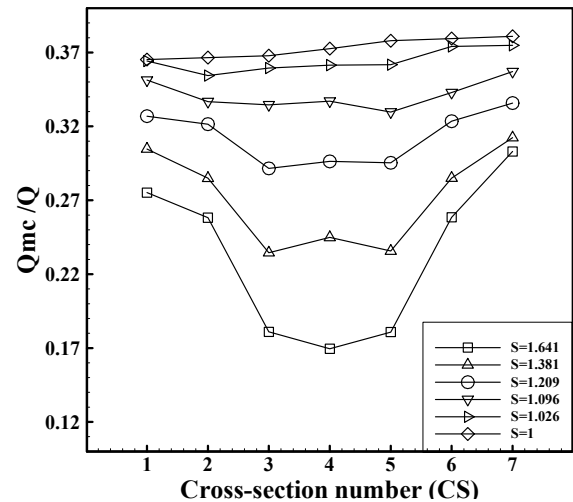


Fig. 17. the ratio of main channel discharge ( $Q_{mc}$ ) and total discharge ( $Q$ ) along half a meander.

قوی تبدیل به افت انرژی می کند. در نتیجه این امر، قابلیت انتقال جریان در مقاطع میانی نسبت به مقاطع CS1 و CS7 کاهش می یابد (لیو و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه بر این با توجه به افزایش زاویه جریان بین کانال اصلی و سیلاب دشت در مقاطع میانی، اثر مولفه افقی جریان سیلاب دشت روی کانال اصلی بیشتر می شود. به عنوان نمونه برای کانال مرکب پیچان با مقدار ضریب خمیدگی ۱/۳۸۱ مطابق شکل (۴) با حرکت در طول خم، مقدار مولفه افقی جریان سیلاب دشت ( $U_{fp} \sin \theta = U_{fp}(y)$ ) با توجه به افزایش مقدار زاویه  $\theta$ ، افزایش یافته (در CS3, 4.5, زاویه  $\theta$  برابر ۶۰ درجه است) و باعث تأثیر روی جریان ثانویه و تغییر دبی عبوری از کانال اصلی می شود. با توجه به شکل (۲۰) در بحرانی ترین حالت، نسبت دبی عبوری از کانال اصلی به دبی کل در مقطع CS4، با افزایش مقدار ضریب خمیدگی از ۱ به ۱/۶۴۱، از ۳۷ درصد به ۱۶ درصد کاهش می یابد. در  $S=1$  زاویه  $\theta$  صفر درجه و در  $S=1.641$  این زاویه به ۷۵ درجه می رسد. بنابراین با افزایش زاویه  $\theta$  و تأثیر بیشتر مولفه افقی سیلاب دشت بالادست روی جریان کانال اصلی، میزان دبی عبوری کاهش می یابد. مطابق شکل (۱۷)، بزرگترین دبی کانال اصلی همیشه در تاج خم پیچان رخ داده (CS1, 7)

جدول ۲. متوسط دبی کل و دبی کانال اصلی و سیلابدشت در طول نیمی از پیچان رود

Case	Sinuosity (S)	Total discharge Q(m <sup>3</sup> /s)	Main channel discharge Q <sub>mc</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Flood plain discharge Q <sub>fp</sub> (m <sup>3</sup> /s)
A	1	0.189	0.070 (0.37)	0.119 (0.63)
B	1.026	0.189	0.068 (0.36)	0.121 (0.64)
C	1.096	0.189	0.064 (0.34)	0.125 (0.66)
D	1.209	0.189	0.059 (0.31)	0.130 (0.69)
E	1.381	0.189	0.051 (0.27)	0.138 (0.73)
F	1.641	0.189	0.043 (0.23)	0.146 (0.77)

Table 2. average total discharge (Q) and average sub-area discharge (Q<sub>mc</sub> and Q<sub>fp</sub>) along half a meander.

CS4 از ۰/۵۱ به ۰/۱۶ متر بر ثانیه می‌رسد و مقدار سرعت متوسط مقطع کانال اصلی به طور میانگین ۵۴ درصد کاهش یافته است.

- مقدار بیشینه ارتفاع سطح آزاد آب با افزایش مقدار ضریب خمیدگی از ۰/۳۰۵ به ۰/۳۳۲ متر در خم خارجی مقطع CS1 و از ۰/۳۰۳ به ۰/۳۲۸ متر در خم خارجی مقطع CS7 افزایش می‌یابد.

- با افزایش مقدار ضریب خمیدگی، مقدار دبی عبوری از کانال اصلی کاهش می‌یابد به طوری که در بحرانی‌ترین حالت، نسبت دبی عبوری از کانال اصلی به دبی کل در مقطع CS4 با افزایش مقدار ضریب خمیدگی از ۱ به ۱/۶۴۱، از ۳۷ درصد به ۱۶ درصد کاهش یافته و میزان دبی عبوری کانال اصلی به طور متوسط ۳۸ درصد کاهش می‌یابد.

## References

- [1] Toebe G.H. & Sooky A. A. 1967 Hydraulics of meandering rivers with flood plains. A. S. C. E. J. of Waterways and Harbors, 33, 213-236.
- [2] Knight D.W. & Demetriou J.D. 1983 Flood plain and main channel flow interaction. Journal of Hydraulic Engineering, 109 (8), 1073-1092.
- [3] Kiely G. 1990 Overbank Flow in Meandering Channels the Important Mechanisms. International Conference on River Flood Hydraulics, 207-217.
- [4] Ervine D.A., Willetts B.B., Sellin R.H.J. & Lorena M. 1993 Factors Affecting Conveyance in Meandering Compound Flows. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 119(12), 1383-1399.
- [5] Shiono K. & Muto Y. 1998 Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow. Journal of Fluid Mechanics, 376, 221-261.
- [6] Shiono K., Muto Y., Knight D. W. & Hyde, A. F. L. 1999 Energy losses due to secondary flow and turbulence in meandering channels with over bank flow. Journal of Hydraulic Research, 37(5), 641-664.

## ۵- منابع

**۴- نتیجه گیری**

در این پژوهش، هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب پیچان تحت اثر تغییر میزان ضریب خمیدگی با استفاده از مدل سازی عددی بررسی شد و نتایج حاصل به شرح زیر است:

- هماهنگی نتایج حاصل از مدل عددی FLOW3D و داده‌های آزمایشگاهی ليو و همکاران در بخش درستی آزمایشی نشان دهنده این است که مدل آشفتگی RNG به خوبی می‌تواند رفتار هیدرولیک جریان در کانال مرکب پیچان را شبیه‌سازی کند.

- با افزایش مقدار ضریب خمیدگی کانال، مقدار V/U در مقطع CS1 افزایش یافته و در نهایت به بیشترین مقدار خود در محدوده ۰/۲۵- تا ۰/۴ می‌رسد. در مقطع CS7 نیز مقدار V/U با توجه به افزایش مقدار ضریب خمیدگی و تغییر جهت جریان در طول کانال پیچان به محدوده ۰/۴- تا ۰/۲۴ می‌رسد.

- با افزایش میزان ضریب خمیدگی، مقدار سرعت طولی حداکثر به سمت سیلابدشت سمت راست (خم داخلی) حرکت کرده و از مقدار آن کاسته می‌شود به طوری که با افزایش مقدار ضریب خمیدگی از ۱ به ۱/۶۴۱، مقدار بیشینه سرعت طولی از ۰/۵۵ به ۰/۴۲ متر بر ثانیه تغییر کرده و موقعیت آن از مرکز کانال اصلی به سمت خم داخلی و در عمق ۰/۲ متر حرکت می‌کند.

- مقدار بیشینه سرعت متوسط عمقی با افزایش مقدار ضریب خمیدگی از ۰/۵۵ به ۰/۳۸ متر بر ثانیه در خم داخلی کاهش می‌یابد.

- با افزایش مقدار ضریب خمیدگی، مقدار سرعت متوسط عبوری از کانال اصلی کاهش می‌یابد به طوری که در بحرانی‌ترین حالت مقدار سرعت متوسط کانال اصلی در مقطع

- of meandering compound channels. *Journal of Hydrology*, 542, 1-17.
- [17] Shan Y., Liu X., Yang K. & Liu C. 2017 Analytical model for stage-discharge estimation in meandering compound channels with submerged flexible vegetation. *Advances in Water Resources*, 108, 170–183.
- [18] Saeed-Golanik S. & Mohammadi, M. 2017 A Numerical Consideration of Hydraulic Aspects of Flow in Meandering Prismatic Compound Channels by Flow3D Model. *Proceedings, 5th International Congress on: Civil Eng., Architecture and Urban Development*; 26-28 December, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (In Persian).
- [19] Shan Y., Huang S., Liu C., Guo Y. & Yang K. 2018 Prediction of the depth-averaged two-dimensional flow direction along a meander in compound channels. *Journal of Hydrology*, 565, 318–330.
- [20] Moncho-Esteve I., García-Villalba M., Muto Y., Shiono K. & Palau-Salvador G. 2018 A numerical study of the complex flow structure in a compound meandering channel. *Advances in Water Resources*, 116, 95–116.
- [21] Muste M. & Ettema R. 2004 Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flatbed channel. *Journal of Hydraulic Eng.*, 130, 635- 646.
- [22] González A.E. & Bombardelli F.A. 2005 Two phase flow theoretical and numerical models for hydraulic jumps including air entrainment. In *Proc. XXXI IAHR Congress*. Seoul. Korea.
- [23] Acharya A. 2001 Experimental study and numerical simulation of flow and sediment transport around a series of spur dikes. PhD Thesis. In the Graduate College. the university of Arizona.
- [7] Shiono K., Al-Romaih J.S. & Knight D.W. 1999 Stage-discharge assessment in compound meandering channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (1), 66–77.
- [8] Spooner J. & Shiono. K. 2003 Compound Meandering Channels with overbank flow. *Water and Maritime Engineering*, 156(3), 225-233.
- [9] Wormleaton P.R., Sellin R.H.J., Bryant T., Loveless J.H., Hey R.D. & Catmur S.E. 2004 Flow structures in a two-stage channel with a mobile bed. *Journal of Hydraulic Research*, 42(2), 145–162.
- [10] De Marchis M. & Napoli E. 2008 The effect of geometrical parameters on the discharge capacity of meandering compound channels. *Advances in Water Resources*, 31, 1662–1673.
- [11] Rameshwaran P., Sun X., Shiono K., Chandler J.H. & Sellin, R. H. J. 2008 *The Modelling of Compound Channel Flow: Physical Model of River Blackwater*, Wallingford. UK.
- [12] Shiono K., Spooner J., Chan TL., Rameshwaran P. & Chandler J.H. 2008 Flow characteristics in meandering channels with non-mobile and mobile beds for overbank flows. *Journal of Hydraulic Research*, 46(1), 113–32.
- [13] Liu C., Wright N., Liu X. & Yang K. 2014 An analytical model for lateral depth-averaged velocity distributions along a meander in curved compound channels. *Advances in Water Resources*, 74, 26–43.
- [14] Mera I., Francat M.J., Anta J. & Peña E. 2014 Turbulence anisotropy in a compound meandering channel with different submergence conditions. *Advances in Water Resources*.
- [15] Liu C., Shan Y., Liu X. & Yang K. 2016 Method for assessing stage-discharge in meandering compound channels. *ICE-Water Manage*, 169(1), 17–29.
- [16] Liu C., Shan Y., Liu X., Yang K. & Liu H. 2016 The effect of floodplain grass on the flow characteristics

# Flow Velocity in Meandering Compound Channel under the Influence of Sinusoidal Change

Mohammad Naghavi<sup>1</sup>, Mirali Mohammadi<sup>2\*</sup>, Ghorban Mahtabi<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate in Civil Eng. Water & Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Faculty of Eng., Urmia University.

\*2- Associate Professor in Civil Eng. Hydraulics & River Eng. Mechanics, Department of Civil Engineering, Faculty of Eng., Urmia University.

3- Assistant Professor in Water Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan.

\*m.mohammadi@urmia.ac.ir

## Abstract

Natural rivers are rarely in direct flow because of regulating energy grade-line, and usually have a curved path to which it is referred to as "meandering channels". After the appearance of meandering rivers, with the passage of time and lateral movement of the meanders, the external bending progression and the sinusoidal or curvature is increased. In meandering channels, the curvature of the meandering sections with a dimensionless number can be defined as the sinusoidal which is the ratio of meander length of main channel to the floodplain length. By increasing sinusoidal slope number, flow velocity and river discharge capacity decrease. As a result, the risk of flood has increased significantly and during floods the water level exceeds to the bankfull and then enters to the floodplains. In this case, due to the interaction between higher velocities in the main channel and the lower velocities in the floodplains and the momentum transfer between these two regions, the flow profile is constantly changing. In this research, the hydraulic characteristics of flow including the depth-averaged velocity, the water surface profile, longitudinal velocity distributions, ratios of transverse to longitudinal velocities in the central axis of the main channel and the mean velocity and flow rate of the main channel along the meandering compound channel have been investigated numerically, regarding the change in the sinusoidal ratio for six types of channels with different sinusoidal ratios. In order to investigate the effect of sinusoidal ratio in meandering compound channels on the hydraulic characteristics of the flow, the FLOW3D software is used. So that, the turbulence model with experimental data have a better compliance. for this purpose, two RNG and k- $\epsilon$  turbulence models were then used and the performance of these two models were investigated to simulate the important hydraulic characteristics of the flow, such as the flow velocity, and it was determined that the RNG turbulence model has a better accuracy than the k- $\epsilon$  turbulence model. In the following, this model was introduced as a final turbulence model for numerical simulations. Numerical simulation results show that by increasing the sinusoidal ratio of channel from 1 to 1.641, the mean velocity of the main channel section is decreased by 54% on average and the flow rate of the main channel decreases by the average of 38%. Also, by increasing the sinusoidal ratio, the maximum depth-averaged velocity,  $U_d$ , decreases from 0.55 m/s to 0.38 m/s, and the maximum free surface height of the water rises from 0.305 m to 0.332 m in the outer bend of the CS1 cross section. By increasing the sinusoidal ratio causes the ratio of the transverse velocity to be increased longitudinally in the central axis of the main channel, so that its value in the most critical state reaches from zero to 0.4. As the sinusoidal ratio increases, the maximum length velocity moves towards the right side floodplain (internal bend) and decreases its value. So that by increasing the sinusoidal ratio from 1 to 1.641, the maximum longitudinal velocity 0.55 m/s to 0.42 m/s and its position moves from the centerline of the main channel to the inner bend over the depth of the main channel overflow.

**Keywords:** Compound Channel, Meandering, Sinusoidal, Depth-Averaged Velocity, FLOW3D.