

Investigation of Flow Hydraulics in Flooded Meandering Rivers under the Effect of Floodplain Width Change

M. Naghavi^{1*}, M. A. Mohammadi^{2*}

1, 2- Ph.D. in Civil Engineering, Hydraulic Structures and Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

*(Corresponding Author Email: m.naghavi@urmia.ac.ir)

Received: 13-11-2023

Revised: 21-01-2024

Accepted: 30-01-2024

Available Online: 26-05-2024

بررسی هیدرولیک جریان در پیچان رودهای سیلابی تحت اثر تغییر عرض سیلاب دشت

محمد نقوی^۱، میرعلی محمدی^۲

۱ و ۲- به ترتیب دکتری مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی و استاد مهندسی عمران-هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: m.naghavi@urmia.ac.ir)

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

Abstract

Flood plains of rivers play a significant role in the transfer of flood discharge. In this research, the vertical distribution of the longitudinal and transverse flow velocities and the amount of discharge passing through different sections of the main channel in flooded meandering rivers under the effect of the change in floodplain width and relative depth were investigated. Because the fact that the width of the floodplain is constantly changing along the river's path, in this article, from the four meandering compound channels with floodplain widths of 3.3, 4.31, 5.32, and 6.33 meters and three relative depths of 0.26, 0.35 and 0.45 were used. The results of the numerical simulation showed that with the increase in the width of the floodplain, the value of longitudinal and transverse flow velocities decreases and these changes in the transverse and longitudinal flow velocities are more noticeable due to the change in the width of the floodplain in the middle sections and above the overflow depth of the main channel, so that with the increase 92% of the width of the floodplain, the value of the maximum transverse and longitudinal flow velocity in the middle section decreases by 21% and 25%, respectively. Also, according to the results of this research, with a 92% increase in the width of the floodplain, the average flow velocity and discharge through different sections of the main channel will decrease by 24% and 33%, respectively.

Keywords: Meandering Compound Channel, Longitudinal Velocity, Transverse Velocity, Floodplain Width Change, Numerical Simulation.

چکیده

سیلاب دشت رودخانه‌ها نقش به‌سزایی در انتقال دبی سیلاب دارند. در این پژوهش توزیع قائم سرعت‌های طولی و عرضی جریان و میزان دبی گذرا از مقاطع مختلف کانال اصلی در پیچان رودهای سیلابی تحت اثر تغییر عرض سیلاب دشت و عمق نسبی بررسی شد. باتوجه‌به اینکه عرض سیلاب دشت در طول مسیر رودخانه دائماً در حال تغییر است، در این پژوهش از چهار کانال مرکب پیچان با عرض سیلاب دشت ۳/۳، ۴/۳۱، ۵/۳۲ و ۶/۳۳ متر و سه عمق نسبی ۰/۲۶، ۰/۳۵ و ۰/۴۵ استفاده شد. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی نشان داد با افزایش عرض سیلاب دشت از مقدار سرعت‌های عرضی و طولی جریان کاسته می‌شود. تغییرات در سرعت‌های عرضی و طولی جریان باتوجه‌به تغییر عرض سیلاب دشت در مقاطع میانی و بالای عمق لبریز کانال اصلی محسوس‌تر است به‌طوری‌که با افزایش ۹۲ درصدی عرض سیلاب دشت، مقدار حداکثر سرعت عرضی و طولی جریان در مقطع میانی، به ترتیب ۲۱ و ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین براساس نتایج این پژوهش، با افزایش ۹۲ درصدی عرض سیلاب دشت، مقدار سرعت متوسط جریان و دبی عبوری از مقاطع مختلف کانال اصلی به ترتیب ۲۴ و ۳۳ درصد کاهش می‌یابد.

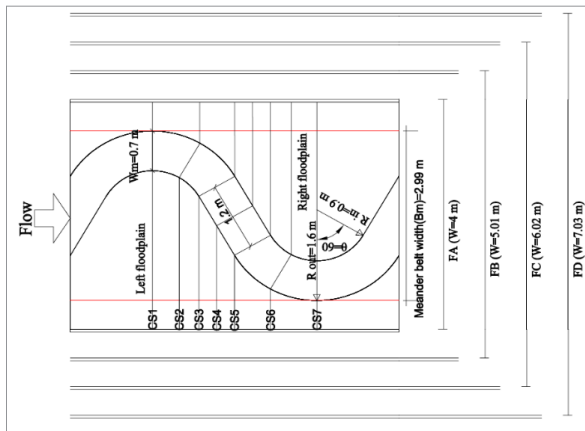
واژه‌های کلیدی: کانال مرکب پیچان، سرعت طولی، سرعت عرضی، تغییر عرض سیلاب دشت، شبیه‌سازی عددی.

با طغیان رودخانه در هنگام وقوع سیل و گسترش آن در سیلاب دشت‌ها، مطالعه عرض سیلاب دشت موجود در حاشیه رودخانه در شرایط سیلابی اهمیت زیادی دارد. رودخانه‌ها در طول مسیر خود با عبور از مناطق مختلف همواره شاهد دستخوش تغییراتی در عرض سیلاب دشت می‌باشند به طوری که در برخی نقاط به‌ویژه در دشت‌ها، عرض سیلاب دشت آن گسترش یافته و در برخی مناطق کوهستانی با کاهش عرض سیلاب دشت مواجه هستند. هر تغییر عرض سیلاب دشت به‌ویژه در مواقع سیلابی روی شرایط هیدرولیکی جریان نقش به‌سزایی دارد. در شرایط عادی رودخانه، جریان در کانال اصلی برقرار است، درحالی‌که در سیلاب‌های شدید، سطح جریان از کانال اصلی فراتر رفته و وارد سیلاب‌دشت‌ها می‌شود. در این حالت، مقطع جریان عبوری به‌صورت یک کانال مرکب در می‌آید. جریان در کانال مرکب با ساختار پیچیده ناشی از وجود لایه برشی در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب دشت شناخته می‌شود. اثر متقابل جریان سریع کانال اصلی و جریان آرام سیلاب دشت در حوالی فصل مشترک منجر به ایجاد آشفتگی و انتقال اندازه حرکت بین این دو ناحیه می‌شود. این تبادل اندازه حرکت موجب ایجاد مقاومت اضافی جریان و در نتیجه کاهش ظرفیت آبگذری کانال می‌شود. پیش‌بینی ویژگی‌های جریان در کانال‌های مرکب پیچان به دلیل ماهیت سه بعدی جریان، یک کار چالش برانگیز برای مهندسان رودخانه می‌باشد و تاکنون در این زمینه پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است. کار میدانی در زمینه هیدرولیک رودخانه تا حدودی دشوار است زیرا هندسه کانال مرکب معمولاً در شرایط طغیان رودخانه اتفاق می‌افتد که جمع‌آوری داده‌ها در این شرایط گاهی خطرناک می‌باشد. برای این منظور اکثر پژوهش‌ها به‌صورت آزمایشگاهی یا عددی می‌باشد. به‌عنوان مثال آزمایش‌هایی توسط Ervine و همکاران (۱۹۹۳)، Shiono و Muto (۱۹۹۸)، Lyness و همکاران (۲۰۰۱)، Wormleaton و همکاران (۲۰۰۴)، Shiono و همکاران (۲۰۰۸) و Naghavi و همکاران (۲۰۲۲؛ ۲۰۲۳a و ۲۰۲۳b) برای بررسی پارامترهای اصلی موثر در کانال‌های مرکب پیچان انجام شد. آن‌ها دریافتند جریان سیلاب می‌تواند به طور قابل توجهی جریان کانال اصلی در بخش‌های مختلف را تحت تأثیر قرار دهد. نتایج این پژوهش‌ها نشان داد با افزایش تراکم ساختمان‌ها، مقدار سرعت بی‌بعد شده جریان در کانال اصلی افزایش یافته و مقدار سرعت جریان در کانال اصلی برای کانال با آرایش موانع سازه‌ای عمود بر جریان سیلاب دشت بیشتر از کانال با آرایش موانع سازه‌ای موازی با جریان سیلاب دشت است. Liu و همکاران (۲۰۱۴) با ارائه یک مدل تحلیلی، توزیع سرعت جریان در طول خم کانال مرکب پیچان را بررسی کردند.

براساس نتایج این پژوهش، نیروی گریز از مرکز عمدتاً در افزایش سرعت عرضی جریان موثر است و باتوجه‌به تأثیر نیروی گریز از مرکز در کانال‌های مرکب پیچان، مقدار سرعت عرضی جریان در کانال اصلی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. Liu و همکاران (۲۰۱۴) خصوصیات جریان در کانال‌های مرکب پیچان را تحت اثر سیلاب دشت پوشیده با چمن بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد وجود چمن در سیلاب دشت روی انتقال کانال تأثیر قابل توجهی دارد و میزان دبی عبوری آن را نسبت به حالت کانال صاف ۳۰ درصد کاهش می‌دهد. Shan و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل تحلیلی برای برآورد منحنی دبی-اشل در کانال مرکب پیچان با پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر مستغرق ارائه کردند. نتایج نشان داد همگرایی خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برقرار است. Shan و همکاران (۲۰۱۸) زاویه مسیر جریان دو بعدی متوسط در امتداد خم پیچان در کانال‌های مرکب پیچان‌رودی را پیش‌بینی کردند. اندازه‌گیری‌ها نشان داد ارتفاع سلول جریان ثانویه در کانال اصلی با پوشش گیاهی در سیلاب دشت نسبت به یک کانال بدون پوشش گیاهی افزایش می‌یابد و زاویه مسیر جریان به ارتفاع سلول جریان ثانویه وابسته است. Moncho-Estevé و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی عددی ساختار جریان در کانال‌های مرکب پیچان و مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی Shiono و Muto (۱۹۹۸) نشان دادند برای شرایطی که سطح جریان در عمق لبریز کانال اصلی واقع شده، انرژی جنبشی حداکثر در نزدیکی دیواره‌ها و بستر کانال اصلی به دلیل نیروی برشی قوی این مناطق رخ می‌دهد. همچنین میزان آشفتگی در سطح آب بیشتر از هسته مرکزی کانال می‌باشد. نقوی و همکاران (۱۳۹۸؛ ۱۳۹۹؛ ۱۴۰۰ الف؛ ۱۴۰۰ ب) پژوهش‌های عددی روی الگوی جریان در کانال‌های مرکب پیچان انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش‌ها با بررسی عددی مشخصات هیدرولیکی جریان در کانال‌های مرکب پیچان و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی نشان دادند نرم‌افزار Flow3D و مدل آشفتگی RNG دقت بالایی در مدل‌سازی کانال مرکب پیچان دارد. در این پژوهش‌ها مشخص شد با افزایش میزان سینوسیته کانال مرکب پیچان، مقدار دبی عبوری از کانال اصلی و سرعت طولی جریان کاهش می‌یابد. نقوی و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از نرم‌افزار Flow3D ساختار جریان و تنش برشی بستر در کانال‌های مرکب پیچان تحت اثر تراکم سازه‌ای سیلاب دشت در مواقع سیلابی را بررسی کردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان داد با افزایش تراکم سازه‌ای روی سیلاب دشت از صفر به ۴۴ درصد، مقدار سرعت متوسط مقطع کانال اصلی به طور میانگین ۵۱ درصد و میزان دبی متوسط عبوری از مقطع کانال اصلی ۸۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار تراکم سازه‌ای روی سیلاب‌دشت، میزان تنش برشی بستر افزایش

جدول ۱- پارامترهای هندسی و هیدرولیکی (مشخصه‌های جریان) کانال‌های مرکب پیچان مورد استفاده در این پژوهش

کانال مورد بررسی	عرض سیلاب دشت (متر)	عرض کانال مرکب (متر)	دبی کل (متر مکعب بر ثانیه)	عمق نسبی (Dr)	عمق جریان (H) (متر)
FA1	۳/۳	۴	۰/۱۸۹	۰/۴۵	۲۵/۵
FA2	۳/۳	۴	۰/۱۱۳	۰/۳۵	۲۱/۶
FA3	۳/۳	۴	۰/۰۸۵	۰/۲۶	۱۸/۹
FB1	۴/۳۱	۵/۰۱	۰/۱۸۹	۰/۴۵	۲۵/۵
FB2	۴/۳۱	۵/۰۱	۰/۱۱۳	۰/۳۵	۲۱/۶
FB3	۴/۳۱	۵/۰۱	۰/۰۸۵	۰/۲۶	۱۸/۹
FC1	۵/۳۲	۶/۰۲	۰/۱۸۹	۰/۴۵	۲۵/۵
FC2	۵/۳۲	۶/۰۲	۰/۱۱۳	۰/۳۵	۲۱/۶
FC3	۵/۳۲	۶/۰۲	۰/۰۸۵	۰/۲۶	۱۸/۹
FD1	۶/۳۳	۷/۰۳	۰/۱۸۹	۰/۴۵	۲۵/۵
FD2	۶/۳۳	۷/۰۳	۰/۱۱۳	۰/۳۵	۲۱/۶
FD3	۶/۳۳	۷/۰۳	۰/۰۸۵	۰/۲۶	۱۸/۹



شکل ۲- پلان جزئیات هندسی و موقعیت مقاطع عرضی

۱- مدل‌سازی عددی و معادلات حاکم

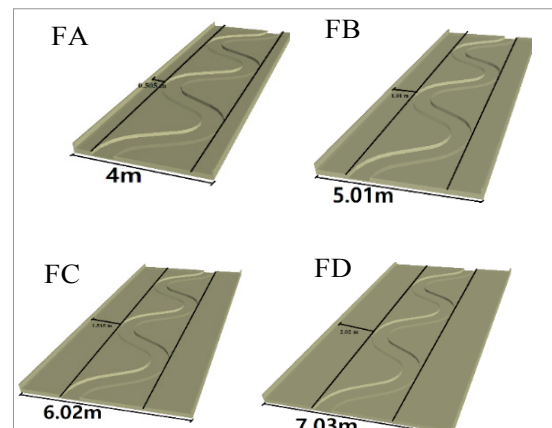
معادلات پایه مورد استفاده در نرم‌افزار Flow3D معادلات ناویر-استوکس می‌باشد که از پنج مدل آشفتگی مختلف در حل خصوصیات جریان‌های آشفتنه استفاده می‌کند. باتوجه به پژوهش‌های انجام شده روی کانال‌های مرکب، مدل آشفتگی RNG انطباق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی داشته، بنابراین در این پژوهش از این مدل آشفتگی در مدل‌سازی استفاده شد (نقوی و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین بررسی مطالعات عددی نشان می‌دهد مدل RNG می‌تواند تنش برشی رینولدز

یافته به طوری که مقدار حداکثر تنش برشی بستر از ۱/۳۲ به ۴/۶۱ پاسکال (حدود ۲۵۰ درصد) افزایش پیدا کرده است و به سمت مرکز کانال اصلی حرکت می‌کند.

در پژوهش‌هایی که تاکنون در کانال‌های مرکب پیچان انجام شده، تغییر عرض سیلاب دشت باتوجه به شرایط توپوگرافی منطقه که بخش مهمی از سیستم‌های رودخانه می‌باشد در نظر گرفته نشده است. بنابراین در این پژوهش اثر تغییر عرض سیلاب دشت و عمق نسبی کانال مرکب پیچان روی پروفیل قائم سرعت طولی و عرضی جریان و همچنین تغییرات دبی جریان عبوری از مقاطع مختلف با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

برای بررسی سرعت طولی و عرضی جریان و همچنین تغییرات دبی جریان عبوری از مقاطع مختلف در کانال‌های مرکب پیچان تحت اثر تغییر عرض سیلاب دشت و عمق نسبی از چهار کانال مرکب پیچان با عرض سیلاب دشت مختلف و سه عمق نسبی متفاوت مطابق شکل (۱) و جدول (۱) استفاده شده است. عمق نسبی ($Dr=h_p/H$) به صورت نسبت عمق جریان در سیلاب دشت (h_p) به عمق جریان در کانال اصلی (H) تعریف می‌شود. در همه کانال‌های مورد استفاده در این پژوهش، عرض و ارتفاع کانال اصلی به ترتیب ۰/۷ و ۰/۱۴ متر، شعاع قوس داخلی و خارجی ۰/۹ و ۱/۶ متر، طول خط اتصال خم‌ها ۱/۲ متر، عرض ناحیه پیچان ۲/۹۹ متر و میزان سینوسیته ($s=L_m/L$) کانال ۱/۳۸۱ می‌باشد (L طول مستقیم کانال و L_m طول مسیر پیچان است). در شکل (۲) پلان مشخصات هندسی کانال مرکب پیچان مورد استفاده در این پژوهش، نشان داده شده است. براساس شکل (۲) سرعت جریان و دبی عبوری از کانال در هفت مقطع با استفاده از نرم‌افزار Flow3D بررسی شد.



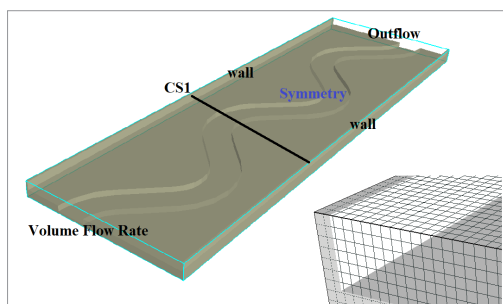
شکل ۱- پلان شماتیک کانال‌های مرکب پیچان مورد استفاده در این پژوهش با عرض سیلاب دشت مختلف

نکند (Naghavi و همکاران، ۲۰۲۳c). در تحقیق حاضر پس از بررسی شبکه‌بندی‌های مختلف براساس جدول (۳) ریزکردن شبکه تا رسیدن به انحنای مناسب در کانال اصلی پیچان رود و نزدیک شدن به نتایج آزمایشگاهی با سعی و خطاهای متعددی انجام شد. همچنین شرایط مرزی اعمال شده برای مدل عددی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که با شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی Liu و همکاران (۲۰۱۴) که برای صحت‌سنجی از آن استفاده شده هماهنگی داشته باشد. بنابراین باتوجه‌به داشتن دبی و عمق جریان ورودی، برای حل معادلات حاکم بر میدان جریان، شرایط مرزی و شبکه‌بندی هندسه کانال براساس جدول (۲) و شکل (۳) تعریف شده است. لازم به ذکر است نرم‌افزار Flow3D فاکتور K_s را به عنوان زبری معادل برای مشخصه ناهمواری بستر به‌صورت مقیاس طولی در نظر می‌گیرد. در این پژوهش باتوجه‌به ضریب زبری مانینگ ($n=0.015$) ارائه شده در آزمایش‌های Liu و همکاران (۲۰۱۴) که در بخش صحت‌سنجی از آن استفاده شده و باتوجه‌به معادله Ackers (۱۹۹۱) که به‌صورت رابطه (۵) ارائه شده است، مقدار K_s برابر 0.003 متر به‌دست آمد، این مقدار در شبیه‌سازی‌ها به‌عنوان ضخامت زبری بستر در نظر گرفته شد.

$$K_s = (8.25n\sqrt{g})^6 \quad (5)$$

جدول ۲- شرایط مرزی اعمال شده به مدل

خروجی کانال	ورودی کانال	دیواره‌های کناری کانال	کف کانال	سقف کانال
خروج جریان	دبی ورودی	دیوار	دیوار	تقارن
Outflow	Volume Flow Rate	wall	Wall	Symmetry



شکل ۳- شرایط مرزی و شبکه‌بندی تعریف شده برای مدل عددی

۳- صحت‌سنجی نتایج

برای صحت‌سنجی و کنترل نتایج استخراج شده در این پژوهش، از داده‌های آزمایشگاهی Liu و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شد. در پژوهش آزمایشگاهی Liu و همکاران (۲۰۱۴) شرایط جریان در

را با دقت پیش‌بینی کرده و جریان‌های ثانویه را به درستی ایجاد کند. معادله پیوستگی و معادله اندازه حرکت در جهت محورهای مختصات سه‌گانه که به معادلات ناویر-استوکس موسوم‌اند برای جریان آشفته تراکم‌ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت و در فرم تانسوری با روابط (۱) و (۲) معرفی می‌شوند (Naghavi و همکاران، ۲۰۲۳c).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (v \frac{\partial U_i}{\partial x_i} - \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

که در آن x_i و x_j محورهای مختصات، t زمان، ρ چگالی سیال، \bar{p} فشار متوسط، U_i و U_j سرعت و $u_i u_j$ تانسور تنش رینولدز می‌باشند. همچنین در این پژوهش، برای پیش‌بینی تغییرات سطح آزاد جریان از روش حجم سیال (VOF) استفاده شد. 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 می‌باشد و از معادلات (۳) و (۴) به‌دست می‌آید.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) \right] + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) + \xi \left(\frac{F A_x u}{X} \right) \right] = FDIF + FSOR \quad (3)$$

$$FDIF = \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (v_F A_x \frac{\partial F}{\partial X} + R \frac{\partial}{\partial X} (v_F A_y \frac{\partial F}{\partial y})) \right] + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial z} (v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z}) + \xi \left(\frac{F A_x v_F}{X} \right) \right] \quad (4)$$

در این روابط، u, v, w مؤلفه‌های سرعت، A_x, A_y, A_z جزء سطحی جریان در جهت‌های x, y, z و V_F جزء حجمی جریان می‌باشند. در سیستم مختصات کارتزین، R برابر ۱ بوده و ξ صفر می‌باشد. FSOR نرخ زمانی تغییرات جزء حجمی سیال ناشی از منبع جرم در یک سلول محاسباتی است. تعریف تابع F وابسته به مسئله‌ای است که مدل می‌شود. چنانچه یک سلول محاسباتی مشخص پر از آب باشد $F=1$ و اگر سلول مورد نظر خالی باشد $F=0$ و اگر سلول مورد نظر حاوی آب‌وهوا باشد $F>0$ است.

۲- شبکه‌بندی میدان جریان و شرایط مرزی

ساختن شبکه مناسب برای میدان حل معادلات، دقت محاسبات، هم‌گرایی و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در کلیه مدل‌های عددی، برای به‌دست آوردن نتایج درست و منطقی و کاهش خطا و زمان شبیه‌سازی، طبق راهنمای برنامه Flow3D ابعاد شبکه به‌صورتی تعیین شد که نسبت اندازه دو سلول مجاور و نسبت شکل تا حد ممکن نزدیک به ۱ باشد و مقدار حداکثر این دو پارامتر به ترتیب از $1/25$ و ۳ تجاوز

را افزایش می‌دهد. در نهایت باتوجه به اختلاف ناچیز بین نتایج شبکه‌بندی نوع F و FS، از شبکه‌بندی نوع F، باتوجه به مدت زمان کمتر محاسبات برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. شکل (۴) مقایسه نتایج عددی پارامترها با شبکه‌بندی نوع F و داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. مقدار خطای ریشه میانگین مربعات سرعت متوسط عمقی (DAV) در مقطع CS1 برای عمق نسبی ۰/۴۵ و ۰/۳۵ به ترتیب ۰/۰۸۱ و ۰/۰۵۲ است که نشان‌دهنده دقت مناسب شبیه‌سازی جریان توسط نرم‌افزار می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات شبکه‌میدان محاسباتی و خطای ریشه میانگین مربعات

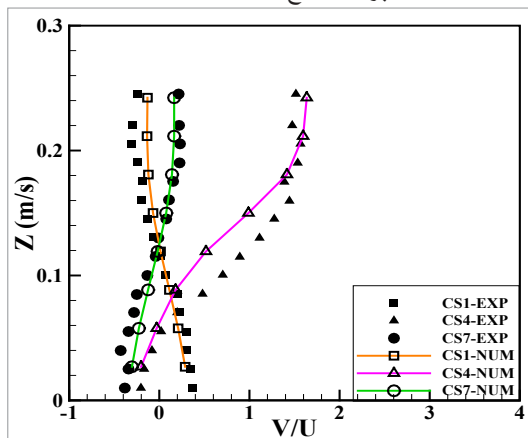
RMSE (DAV)-CS1 Dr=0.35 (m/s)	RMSE (DAV)-CS1 Dr=0.45 (m/s)	ابعاد مش مکعبی منظم (سانتی‌متر)	نوع شبکه‌بندی
۰/۱۱۴	۰/۱۳۱	۳	درشت (C)
۰/۰۸۷	۰/۱۰۳	۱/۵	متوسط (M)
۰/۰۵۲	۰/۰۸۱	۱	ریز (F)
۰/۰۵۱	۰/۰۷۹	۰/۷۵	خیلی ریز (FS)

کانال FA1، FA2 و FA3 (براساس جدول ۱) بررسی شد. در این پژوهش از داده‌های مربوط به سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1 و نسب سرعت عرضی به سرعت طولی جریان (V/U) در مقاطع CS1-7 برای صحت‌سنجی استفاده شد. به‌منظور بررسی میزان دقت نتایج مدل عددی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی پس از بررسی شبکه‌بندی‌های مختلف براساس جدول (۳) از شاخص آماری خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) براساس رابطه (۶) استفاده شد.

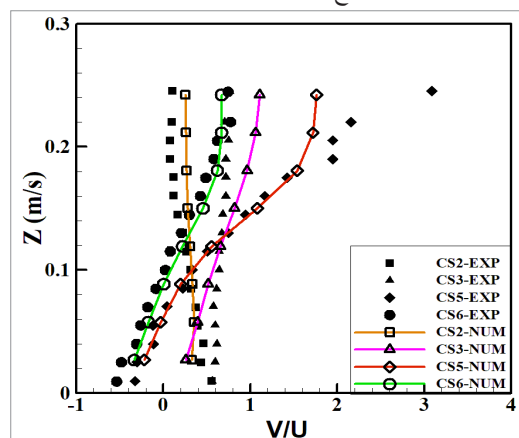
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - N_i)^2} \quad (6)$$

در این رابطه E_i و N_i به ترتیب مقادیر داده‌های عددی و آزمایشگاهی و n تعداد داده‌ها می‌باشد. در جدول (۳) عبارت DAV سرعت متوسط عمقی است. باتوجه به نتایج جدول (۳) مشخص شد خطای ریشه میانگین مربعات پارامترهای جریان بر اساس شبیه‌سازی با شبکه‌بندی ریز (نوع F) در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی اختلاف ناچیزی دارد. همچنین در استفاده از شبکه‌بندی نوع FS، نتایج به‌دست آمده، اختلاف بسیار ناچیزی با شبکه‌بندی نوع F دارد، بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت کاهش ابعاد شبکه به بیش از یک مقدار معین، تنها کمی باعث بهتر شدن نتایج می‌شود اما مدت زمان شبیه‌سازی

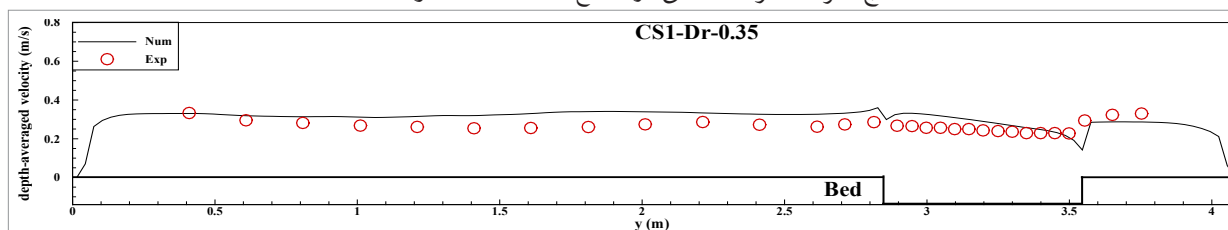
ب- نسبت سرعت عرضی به طولی در مرکز کانال اصلی FA1 برای مقاطع CS1, CS4, CS7



الف- نسبت سرعت عرضی به طولی در مرکز کانال اصلی FA1 برای مقاطع CS2, CS3, CS5, CS6



ج- سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1 کانال FA1 و FA2

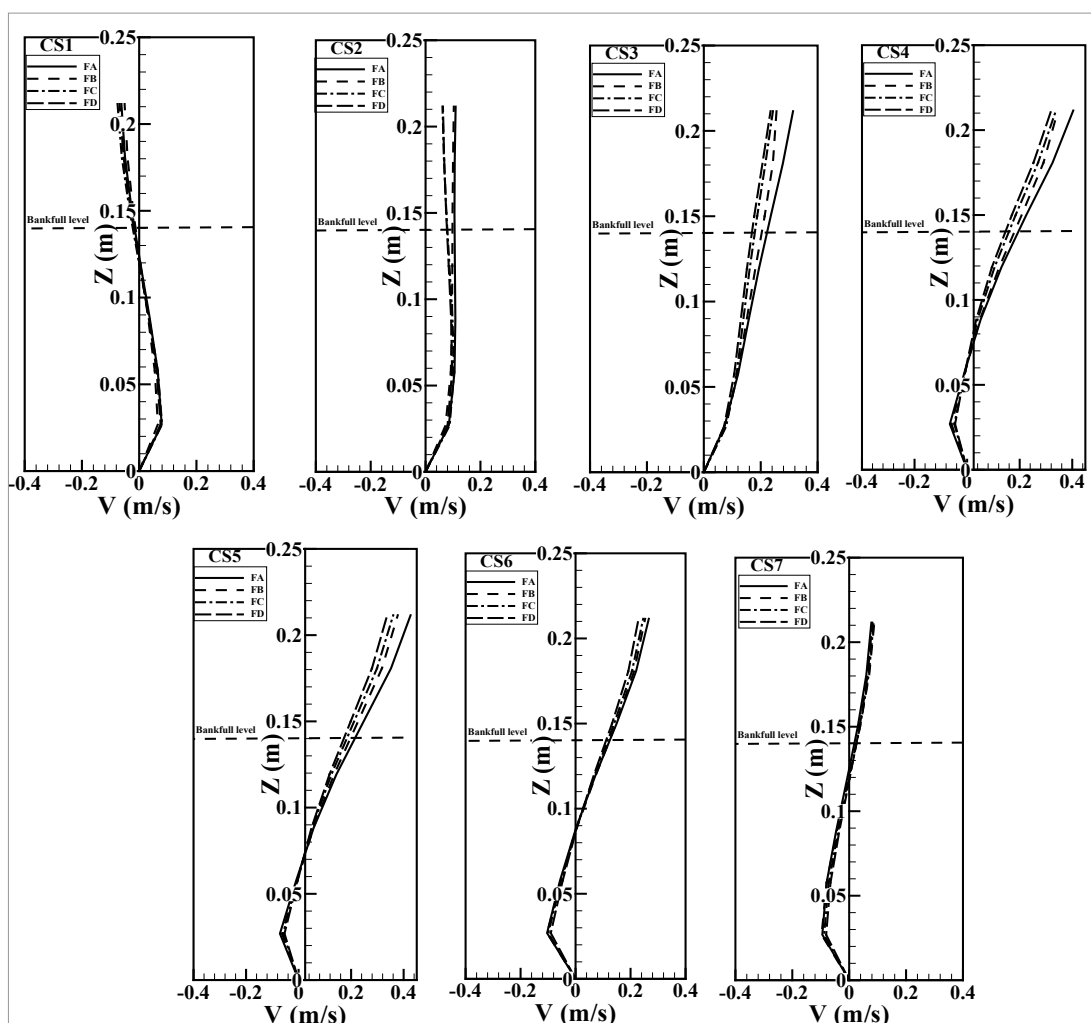


شکل ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی (Liu و همکاران، ۲۰۱۴) و عددی سرعت جریان و منحنی دبی-عمق برای مدل با شبکه‌بندی نوع F

براساس شکل (۵)، در مقاطع میانی (CS2,3,4,5,6) باتوجه به عبور جریان سیلاب دشت بالادست از روی کانال اصلی، قدرت جریان عرضی افزایش می‌یابد و این افزایش در بالای عمق لبریز در مقطع CS4 به اوج خود می‌رسد. در مقاطع CS1,7 نیز باتوجه به زاویه عبور جریان عبوری سیلاب دشت، میزان سرعت عرضی جریان به حداقل مقدار خود می‌رسد. در یک کانال مرکب پیچان با حرکت در طول خم، زاویه بین راستای جریان کانال اصلی و راستای سیلاب دشت مستقیم تغییر می‌کند (به‌عنوان مثال در کانال مرکب پیچان FA با میزان سینوسیته $1/381$ زاویه θ در مقطع CS1 برابر صفر درجه و در مقطع CS3 برابر 60 درجه می‌باشد). بنابراین جریان عرضی ناشی از سیلاب دشت بالادست در طول خم پیچان با افزایش زاویه مقطع جریان افزایش می‌یابد.

۱- پروفیل قائم سرعت عرضی جریان در مرکز کانال اصلی

در شکل (۵) توزیع سرعت عرضی جریان در محور عمود بر مرکز کانال اصلی در مقاطع مختلف باتوجه به تغییر عرض سیلاب دشت در عمق نسبی $0/45$ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش عرض سیلاب دشت از میزان سرعت عرضی جریان کاسته می‌شود و این تغییرات در مقاطع میانی و بالای عمق لبریز کانال اصلی محسوس‌تر است به طوری که با افزایش 92 درصدی عرض سیلاب دشت، مقدار حداکثر سرعت عرضی جریان در مقطع میانی CS4، 21 درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۵- توزیع سرعت عرضی جریان در محور عمود بر مرکز کانال اصلی

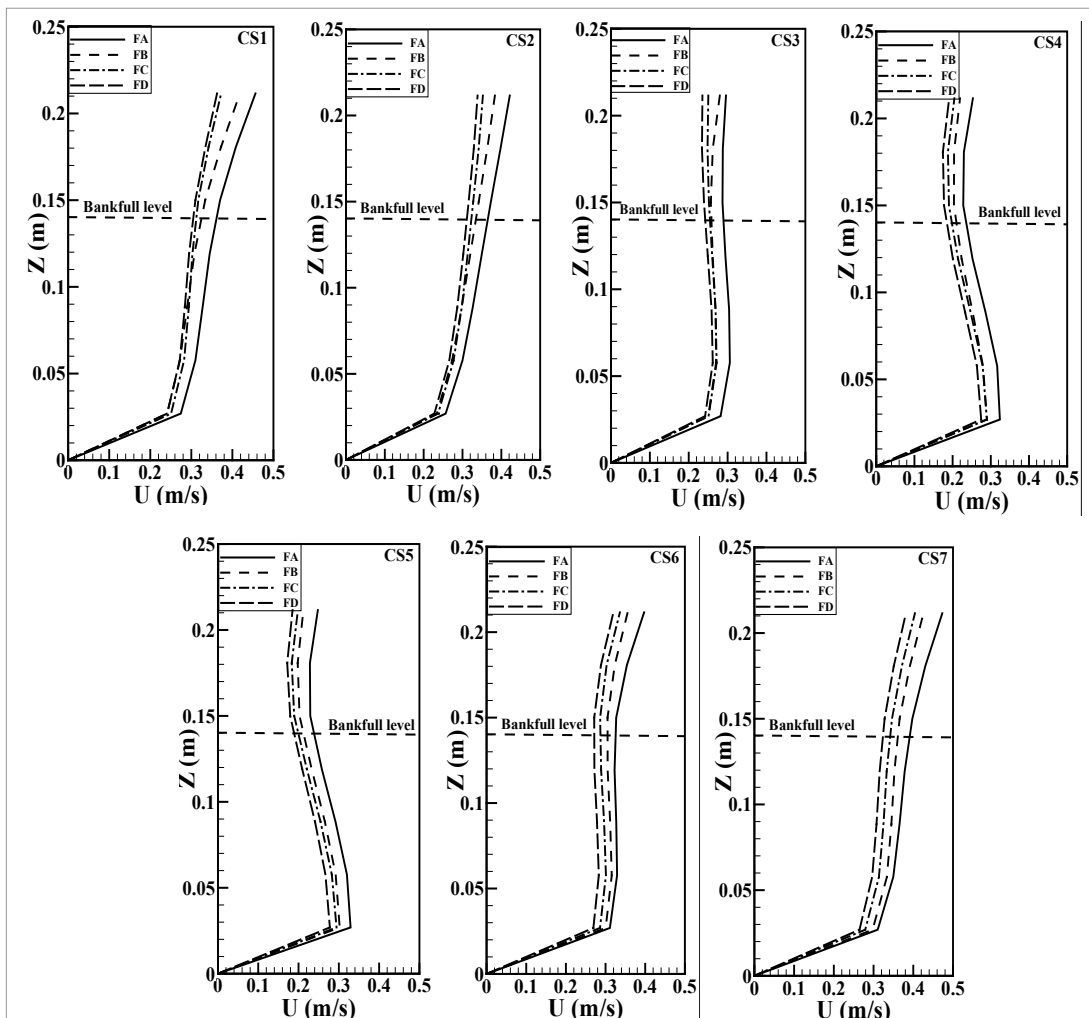
دشت در عمق نسبی $0/45$ نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش عرض سیلاب دشت از میزان سرعت طولی جریان کاسته می‌شود و این تغییرات در

۲- پروفیل قائم سرعت طولی جریان در مرکز کانال اصلی

در شکل (۶) توزیع سرعت طولی جریان در محور عمود بر مرکز کانال اصلی در مقاطع مختلف باتوجه به تغییر عرض سیلاب

جریان به حداکثر مقدار خود می‌رسد. با افزایش عرض سیلاب دشت از ۳/۳ متر در کانال FA به ۶/۳۳ متر در کانال FD (۹۲ درصد افزایش) مطابق شکل (۶) با افزایش ۹۲ درصدی عرض سیلاب دشت، مقدار حداکثر سرعت طولی جریان در مقاطع راس خم (CS1, CS7) ۲۰ درصد و در مقطع میانی CS4، ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

کانال FA به FB محسوس‌تر است. در مقاطع میانی (CS3,4,5) باتوجه به زاویه جریان سیلاب دشت عبوری از روی کانال اصلی و افزایش قدرت عرضی جریان، از مقدار سرعت طولی در بالای عمق لبریز کانال اصلی کاسته می‌شود اما در مقاطع (CS1,7) باتوجه به راستای جریان سیلاب دشت عبوری، قدرت جریان عرضی بسیار ناچیز است، بنابراین در این مقاطع سرعت طولی

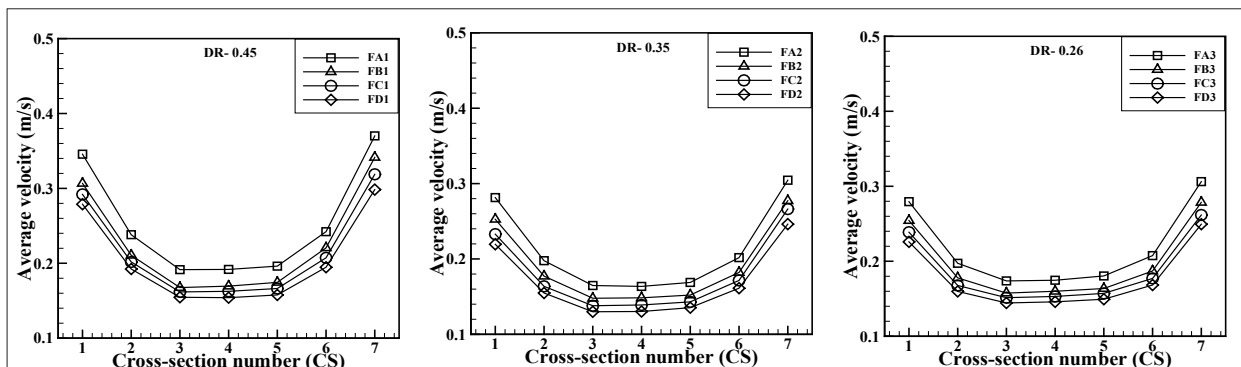


شکل ۶- توزیع سرعت طولی جریان در محور عمود بر مرکز کانال اصلی

تغییرات برای عرض سیلاب دشت پایین محسوس‌تر است (تغییر عرض سیلاب دشت از کانال FA به کانال FB) و به طور متوسط برای تمامی عمق‌های نسبی، مقدار سرعت متوسط کانال اصلی با افزایش ۹۲ درصدی عرض سیلاب دشت (از کانال FA به کانال FD) ۲۴ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مطابق این شکل، در تمام کانال‌ها با افزایش عمق نسبی بر میزان سرعت متوسط مقاطع اصلی افزوده می‌شود به طوری که در عمق‌های نسبی بالا (از ۰/۳۵ به ۰/۴۵) این تغییرات محسوس‌تر است.

۳- تغییرات سرعت متوسط و میزان دبی عبوری از کانال اصلی در مقاطع مختلف

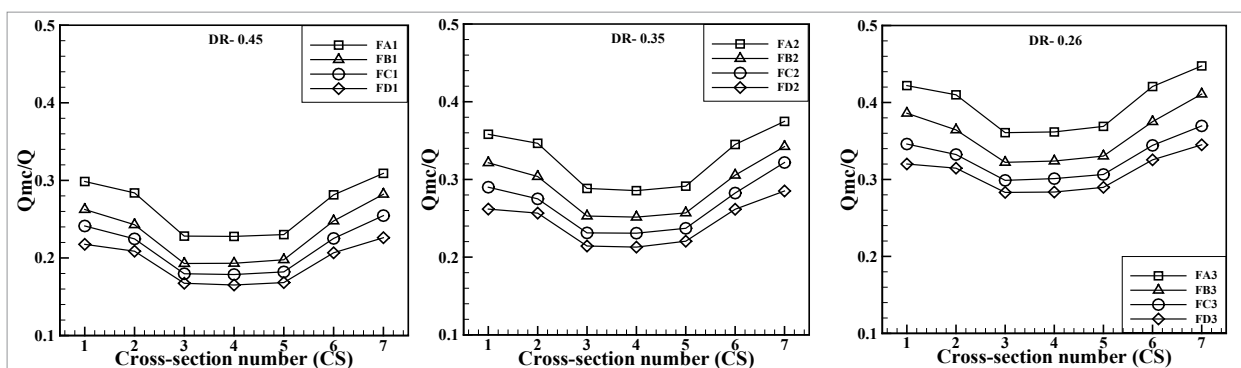
در این بخش سرعت متوسط کانال اصلی در مقطع CS1 تا CS7 کانال‌های مرکب پیمان باتوجه به تغییر عرض سیلاب دشت و عمق نسبی محاسبه می‌شود. شکل (۷) این تغییرات را برای کانال‌های FA تا FD نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودارها مشخص است با افزایش عرض سیلاب دشت، مقدار سرعت متوسط کانال اصلی کاهش می‌یابد به طوری که این



شکل ۷ - سرعت متوسط کانال اصلی در مقاطع مختلف

کاهش می‌یابد. علاوه بر این باتوجه به افزایش زاویه جریان بین کانال اصلی و سیلاب دشت در مقاطع میانی، اثر مولفه افقی جریان سیلاب دشت روی کانال اصلی بیشتر می‌شود. به عنوان مثال برای کانال مرکب پیچان مقدار مولفه افقی جریان سیلاب دشت $(U_{fp}(y) = U_{fp} \sin \theta)$ باتوجه به افزایش مقدار زاویه θ ، افزایش یافته (در $CS_{3,4,5}$ زاویه θ برابر ۶۰ درجه می باشد) و باعث تأثیر روی جریان ثانویه و تغییر دبی عبوری از کانال اصلی می‌شود. همچنین برای تمامی عمق‌های نسبی، میزان دبی عبوری از کانال اصلی با افزایش ۹۲ درصدی عرض سیلاب دشت (از کانال FA به کانال FD) به طور متوسط ۳۳ درصد کاهش می‌یابد و در تمامی کانال‌ها با افزایش عمق نسبی بر میزان دبی عبوری از کانال اصلی افزوده می‌شود.

در ادامه میزان دبی عبوری از هر مقطع کانال اصلی باتوجه به تغییر عرض سیلاب دشت کانال مرکب پیچان محاسبه شده است. در شکل (۸) این میزان تغییرات بر اساس نسبت دبی عبوری از کانال اصلی به دبی کل (Q_{mc}/Q) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود با افزایش عرض سیلاب دشت از ۳/۳ به ۶/۳۳ متر (کانال FA به FD)، مقدار دبی عبوری از کانال اصلی کاهش می‌یابد. در مقاطع میانی (CS2-CS6)، جریان عرضی سیلاب دشت بالادست در کانال اصلی پیچان رود غرق شده و با جریان این کانال برخورد می‌کند. این فرایند، انرژی جنبشی اضافی را با تولید تنش برشی عمودی قوی تبدیل به افت انرژی می‌کند. در نتیجه این امر، قابلیت انتقال جریان در مقاطع میانی نسبت به مقاطع CS1 و



شکل ۸ - میزان دبی عبوری از کانال اصلی در مقاطع مختلف

کاسته می‌شود و این تغییرات در مقاطع میانی و بالای عمق لریز کانال اصلی محسوس‌تر است به طوری که با افزایش ۹۲ درصدی عرض سیلاب دشت، مقدار حداکثر سرعت عرضی جریان در مقطع میانی CS4، ۲۱ درصد کاهش می‌یابد. - با افزایش عرض سیلاب دشت از میزان سرعت طولی جریان کاسته می‌شود به طوری که با افزایش ۹۲ درصدی عرض سیلاب دشت، مقدار حداکثر سرعت طولی جریان در مقاطع راس خم (CS1، CS7) ۲۰ درصد و در مقطع میانی CS4، ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، سرعت‌های طولی و عرضی جریان و میزان دبی گذرا از کانال اصلی در مقاطع مختلف کانال‌های مرکب پیچان باتوجه به تغییر عرض سیلاب دشت و عمق نسبی بررسی شد. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان نتایج حاصل از این تحقیق را به شرح زیر بیان نمود:
- با افزایش عرض سیلاب دشت از میزان سرعت عرضی جریان

- Advances in Water Resources, 74, 26-43. doi: [10.1016/j.advwatres.2014.08.003](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.08.003)
- Liu, C., Shan, Y., Liu, X., Yang, K., & Liu, H. (2016). The effect of floodplain grass on the flow characteristics of meandering compound channels. *Journal of Hydrology*, 542, 1-17. doi: [10.1016/j.jhydrol.2016.07.037](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.037)
- Lyness, J. F., Myers, W. R. C., Cassells, J. B. C., & O'Sullivan, J. J. (2001). The influence of planform on flow resistance in mobile bed compound channels. *Proceedings of the ICE - Water and Maritime Engineering*, 148(1), 5-14. doi: [10.1680/wama.148.1.5.40367](https://doi.org/10.1680/wama.148.1.5.40367)
- Moncho-Esteve, I., Palau-Salvador, G., García-Villalba, M., Muto, Y. and Shiono, K. (2018). A numerical study of the complex flow structure in a compound meandering channel. *Advances in Water Resources*, 116, 95-116. doi: [10.1016/j.advwatres.2018.03.013](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.03.013)
- Naghavi, M., Mohammadi, M., & Mahtabi, G. (2022). An experimental evaluation of the blocks in floodplain on hydraulic characteristics of flow in a meandering compound channel. *Journal of Hydrology*, 612, 127976. doi: [10.1016/j.jhydrol.2022.127976](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127976)
- Naghavi, M., Mohammadi, M., & Mahtabi, G. (2023a). The effect of building arrangement on the flow characteristics in meandering compound channels. *Journal of Environmental Management*, 331, 117288. doi: [10.1016/j.jenvman.2023.117288](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117288)
- Naghavi, M., Mohammadi, M., Mahtabi, G., & Abraham, J. (2023b). Experimental assessment of velocity and bed shear stress in the main channel of a meandering compound channel with one-sided blocks in floodplain. *Journal of Hydrology*, 617, 129073. doi: [10.1016/j.jhydrol.2023.129073](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129073)
- Naghavi, M., Mohammadi, M., & Mahtabi, G. (2023c). Transverse Velocities and Vortices in Compound Meandering Channel: Effect of Building Arrangement in the Floodplains. *Journal of Hydraulic Structures*, 6(3), 66-87. 117288. doi: [10.22055/jhs.2023.45051.1267](https://doi.org/10.22055/jhs.2023.45051.1267)
- 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. doi: [10.1016/j.advwatres.2017.07.021](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.07.021)
- در مقاطع میانی (CS3,4,5) باتوجه به زاویه جریان سیلاب دشت عبوری از روی کانال اصلی و افزایش قدرت عرضی جریان، کاهش مقدار سرعت طولی در بالای عمق لبریز کانال اصلی محسوس تر است.
- با افزایش عرض سیلاب دشت، مقدار سرعت متوسط و دبی عبوری از هر مقطع کانال اصلی کاهش می یابد به طوری که این تغییرات برای عرض سیلاب دشت پایین محسوس تر است (تغییر عرض سیلاب دشت از کانال FA به کانال FB) و به طور متوسط برای تمامی عمق های نسبی، مقدار سرعت متوسط و دبی عبوری از هر مقطع کانال اصلی با افزایش ۹۲ درصدی عرض سیلاب دشت (از کانال FA به کانال FD) به ترتیب ۲۴ و ۳۳ درصد کاهش می یابد.

منابع

- نقوی، محمد، محمدی، میرعلی، و مهتابی، قربان. (۱۳۹۸). سرعت جریان در کانال مرکب پیچان تحت تأثیر ضریب خمیدگی. *مهندسی عمران مدرس*، ۱۹(۵)، ۲۰۸-۲۱۹. <https://mcej.modares.ac.ir/article-16-30266-fa.html>
- نقوی، محمد، محمدی، میرعلی، و مهتابی، قربان. (۱۳۹۹). شدت آشفستگی و تنش برشی جداره در کانال مرکب پیچان تحت اثر تغییر ضریب خمیدگی. *مدل سازی در مهندسی*، ۱۸(۶۰)، ۵۳-۶۹. doi: [10.22075/JME.2019.18692.1776](https://doi.org/10.22075/JME.2019.18692.1776)
- نقوی، محمد، محمدی، میرعلی، و مهتابی، قربان. (۱۴۰۰). الف). خصوصیات جریان های عرضی در کانال های مرکب پیچان. *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۵۳(۸)، ۳۴۹۹-۳۵۱۶. doi: [10.22060/CEEJ.2021.17983.6728](https://doi.org/10.22060/CEEJ.2021.17983.6728)
- نقوی، محمد، محمدی، میرعلی، و مهتابی، قربان. (۱۴۰۰). ب). تأثیر عمق نسبی سیلاب روی هیدرولیک جریان در کانال های مرکب پیچان. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۱(۳)، ۷۸-۵۵. doi: [10.22125/TWE.2021.128113](https://doi.org/10.22125/TWE.2021.128113)
- نقوی، محمد، محمدی، میرعلی، و مهتابی، قربان. (۱۴۰۳). اثر تراکم سازه های حاشیه پیچان رودها روی مشخصات جریان در مواقع سیلابی. *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۴(۱)، ۱۲۳-۱۳۹. doi: [10.22059/TWIM.2023.364637.1101](https://doi.org/10.22059/TWIM.2023.364637.1101)
- Ervine, D. A., Willetts, B. B., Sellin, R. H. J., & Lorena, M. (1993). Factors Affecting Conveyance in Meandering Compound Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(12), 1383-1399. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1993\)119:12\(1383\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:12(1383))
- 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.

- 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. doi: [10.1016/j.jhydrol.2018.08.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.004)
- Shiono, K., & Muto, Y. (1998). Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 376, 221-261. doi: [10.1017/S0022112098002869](https://doi.org/10.1017/S0022112098002869)
- Shiono, K., Spooner, J., Chan, T. L., 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), 113-132. doi: [10.1080/00221686.2008.9521848](https://doi.org/10.1080/00221686.2008.9521848)
- Wormleaton, P. R., Sellin, R. H. J., & Bryant, T. (2004). Conveyance in a two-stage meandering channel with a mobile bed. *Journal of Hydraulic Research*, 42(5), 493-506. doi: [10.1080/00221686.2004.9641219](https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9641219)