



The effect of structures density in the banks of meandering rivers on the flow characteristics during floods

Mohammad Naghavi¹ | Mirali Mohammadi² | Ghorban Mahtabi³

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: ghmahtabi@znu.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: abcdef@ut.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-mail: abcdef@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 31 August 2023
Received in revised form
3 November 2023
Accepted 7 November 2024
Published online 14 March 2024

Keywords:

Compound channel
Meandering
Structural density
Flow structure

ABSTRACT

Rivers as a natural drainage of a watershed have always been of interest in draining the runoff resulting from precipitation, especially during floods. Due to the formation of most cities and villages on the banks of rivers and the construction of structures in their floodplains, during floods, the pattern of river flow always undergoes changes, so it is necessary to study the interaction of flood flows of meandering compound channel in these areas. In this research, by using Flow3D software, which is a powerful software in the field of computational fluid dynamics, the flow structure and bed shear stress in meandering compound channel under the effect of structural density of floodplain during floods have been investigated. For this purpose, six types of structural density of 0, 8, 16, 11, 25 and 44% have been used on the floodplain using non-submerged blocks with distances of 7, 14, 21, 28 and 35 cm. The results of the numerical simulation showed that with the increase of structural density in the floodplain from zero to 44%, the average velocity of the main channel, the maximum water surface elevation and the amount of flow passing through the main channel increased by 51%, 25% and 84% respectively. Also, with the increase in structural density on the floodplain, the amount of bed shear stress has increased so that the maximum bed shear stress has increased from 1.32 to 4.61 pascal (250 percent) and moves towards the center of the main channel.

Cite this article: Naghavi, M., Mohammadi, M., & Mahtabi, Gh. (2024). The effect of structures density in the banks of meandering rivers on the flow characteristics during floods. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (1), 123-139. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.364637.1101>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.364637.1101>

Publisher: The University of Tehran Press.



اثر تراکم سازه‌های حاشیه پیچان رودها روی مشخصات جریان در مواقع سیلابی

محمد نقوی^۱ | میرعلی محمدی^۲ | قربان مهتابی^۳

۱. گروه آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: m.naghavi@urmia.ac.ir
۲. گروه هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: m.mohammadi@urmia.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: ghmahtabi@znu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

رودخانه‌ها به‌عنوان زه‌کش طبیعی یک حوضه آبریز در تخلیه رواناب حاصل از بارش، به‌ویژه در مواقع سیلابی همواره موردتوجه بوده است. با توجه به شکل‌گیری اکثر شهرها و روستاها در حاشیه رودخانه‌ها و احداث سازه‌هایی در سیلاب‌دشت آن‌ها یا گاهی تعرض به سیلاب‌دشت‌ها، در مواقع سیلابی الگوی جریان رودخانه‌ها همواره دچار تغییراتی می‌شود، لذا مطالعه اندرکنش جریان‌های سیلابی در کانال‌های مرکب پیچان در این مناطق، ضروری به‌نظر می‌رسد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار Flow3D که یک نرم‌افزار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است، به بررسی ساختار جریان و تنش برشی بستر در کانال مرکب پیچان تحت تأثیر تراکم سازه‌های سیلاب‌دشت در مواقع سیلابی پرداخته شده است. برای این منظور از شش نوع تراکم سازه‌های صفر، هشت، ۱۱، ۱۶، ۲۵ و ۴۴ درصد روی سیلاب‌دشت با استفاده از بلوک‌های غیرمستغرق و با فاصله‌های هفت، ۱۴، ۲۱، ۲۸ و ۳۵ سانتی‌متر استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان داد که با افزایش تراکم سازه‌های روی سیلاب‌دشت از صفر به ۴۴ درصد، مقدار سرعت متوسط مقطع کانال اصلی به‌طور میانگین ۵۱ درصد، حداکثر ارتفاع سطح آزاد آب ۲۵ درصد و میزان دبی متوسط عبوری از مقطع کانال اصلی ۸۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار تراکم سازه‌های روی سیلاب‌دشت، میزان تنش برشی بستر افزایش یافته، به‌طوری‌که مقدار حداکثر تنش برشی بستر از $۱/۳۳$ به $۴/۶۱$ پاسکال (حدود ۲۵۰ درصد) افزایش نموده و به سمت مرکز کانال اصلی حرکت می‌کند.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴

کلیدواژه‌ها:

کانال مرکب

پیچان رود

تراکم سازه‌های

ساختار جریان

استناد: نقوی، محمد؛ محمدی، میرعلی و مهتابی، قربان (۱۴۰۳). اثر تراکم سازه‌های حاشیه پیچان رودها روی مشخصات جریان در مواقع سیلابی. نشریه

مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۱)، ۱۳۹-۱۲۳. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.364637.1101>



۱. مقدمه

رودخانه‌ها در مسیر خود با عبور از مناطق مسکونی شهری و روستایی معمولاً دارای مسیر پیچان بوده و به‌ندرت رودخانه‌ای وجود دارد که در طول قابل توجهی از مسیر خود به‌صورت مستقیم باشد. در هنگام بروز سیلاب، سطح آب از مقطع اصلی رودخانه فراتر رفته و وارد دشت‌های سیلابی آن می‌شود. در این حالت جریان آب با عبور از سازه‌های واقع در سیلاب‌دشت از قبیل منازل مسکونی شهری و روستایی، کمپ‌های تفریحی و گردشگری، پایه و کوله‌های پل، تأسیسات و ایستگاه‌های پمپاژ و هر سازه‌ای دیگری که ممکن است در سیلاب‌دشت واقع شده باشد، دچار تغییرات خواهد شد. در این حالت مقطع جریان عبوری به‌صورت یک کانال مرکب در می‌آید. کانال‌های مرکب مقاطع هیدرولیکی می‌باشند که از دو بخش کانال اصلی و سیلاب‌دشت تشکیل یافته‌اند. کانال اصلی بخشی است که تراز کف آن پایین‌تر از سیلاب‌دشت بوده و عموماً رواناب‌های معمول و دبی پایه را که در اکثر مواقع در رودخانه جریان دارد، منتقل می‌کند. جریان در کانال‌های مرکب با جریان در کانال‌های ساده متفاوت است، چرا که اختلاف سرعت بین ناحیه سیلاب‌دشت و کانال اصلی به‌دلیل تفاوت قابل توجه زبری، عمق جریان و شکل مقطع در ناحیه سیلاب‌دشت و کانال اصلی باعث انتقال اندازه حرکت و ایجاد آشفتگی بین این دو ناحیه می‌شود. هنگامی که رودخانه به‌صورت کانال اصلی و بسترهای سیلابی و هم‌چنین انحنا دار مدل‌سازی گردد، پیچیدگی مسئله فوق‌العاده بیش‌تر می‌گردد. در کانال‌های مرکب پیچان معمولاً کانال اصلی مسیری پیچان و سیلاب‌دشت‌ها مسیری مستقیم دارند. به‌علت انحنا بردن کانال اصلی، آبی که در بسترهای سیلابی جاری است از روی آبی که در کانال اصلی در جریان است عبور کرده و در نتیجه اندرکنش‌ها و تبدلات بیش‌تری بین آن‌ها رخ می‌دهد که باید در مدل‌سازی جریان مدنظر قرار گیرند. با توجه به هزینه بسیار زیاد و خطرات احتمالی مطالعات میدانی به‌ویژه در مواقع سیلابی توجه بیش‌تر پژوهش‌گران به سمت مدل‌سازی فیزیکی یا شبیه‌سازی عددی معطوف شده است. بررسی مکانیسم جریان کانال‌های مرکب پیچان موضوع پژوهش بسیاری از پژوهش‌گران بوده است. به‌عنوان نمونه، Toebe and Sooky (1967) هیدرولیک جریان کانال مرکب پیچان و اتلاف انرژی مشاهده‌شده در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت را موردبررسی قرار دادند. Knight *et al.* (1983) با بررسی مشخصه‌های اندرکنش کانال اصلی و سیلاب‌دشت در کانال‌های مرکب به این نتیجه رسیدند که جریان در ناحیه‌های کم‌عمق باعث شتاب منفی جانبی در کانال اصلی می‌گردد. Kiely (1990) با مطالعه پارامترهای سرعت، دبی، شدت آشفتگی و جریان‌های ثانویه در مقاطع مرکب مستقیم و پیچان، اظهار داشت که شدت آشفتگی در کانال پیچان بیش‌تر از کانال مستقیم می‌باشد و حداکثر مقدار آن در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت در قوس داخلی رخ می‌دهد. هم‌چنین در این پژوهش مشخص شد که شدت جریان‌های ثانویه در کانال‌های پیچان بسیار بیش‌تر از کانال‌های مستقیم است و این جریان‌ها مشخصات سطح آزاد آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به‌طوری‌که آب در قوس بیرونی انباشته شده و شیبی رو به پایین به سمت قسمت داخلی دارد و سرعت در کانال اصلی کانال‌هایی پیچان، می‌تواند تا ۵۰ درصد نسبت به معادل آن در کانال‌های مستقیم کاهش یابد. هم‌چنین نمونه آزمایش‌هایی در زمینه ساختار جریان در کانال‌های مرکب مستقیم و پیچان تحت عنوان FCF متعلق به دانشگاه بیرمنگام در دو بخش A و B انجام شده است (Da Silveira, 1992). Sellin and Willetts (1996) طی مطالعاتی نشان دادند که سرعت بیشینه در کانال مرکب پیچان در نزدیکی قوس داخلی و در راس آن به‌وجود می‌آید، اما سپس کاهش یافته و به‌طرف قوس بیرونی خم حرکت می‌کند تا به پایین دست می‌رسد. Spooner and Shiono (2003) مدل ریاضی دو بعدی برای پیش‌بینی توزیع عرضی سرعت و تنش برشی بستر در مقاطع مرکب پیچان با صرف‌نظر کردن اثر افت انرژی ناشی از نیروی گریز از مرکز و جریان ثانویه ارائه دادند. Yang *et al.* (2007) تأثیر پوشش گیاهی سیلاب‌دشت را بر ساختار جریان مقاطع مرکب موردبررسی قرار دادند و مشخص شد که پوشش گیاهی سیلاب‌دشت باعث کاهش سرعت جریان در دشت‌های سیلابی می‌شود. De Marchis and Napoli (2008) اثر پارامترهای هندسی را روی ظرفیت انتقال کانال مرکب

پیچان مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل عددی نشان داد که میزان سینوسیته، پارامتر اصلی است که باید در فرمول‌های تجربی برای ارزیابی ظرفیت انتقال کانال‌ها مورد توجه قرار گیرد. Mushatet (2011) شبیه‌سازی جریان آشفته درون کانال را با زبری‌هایی که اغتشاش را تشدید می‌کردند، انجام داد. وی در شبیه‌سازی خود با استفاده از مدل عددی دریافت که اندازه و طول ناحیه چرخش با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد و انرژی جنبشی آشفته‌گی در نزدیکی دیواره با افزایش ارتفاع دندانه یا نسبت انقباض کاهش خواهد یافت. Liu *et al.* (2014) با ارائه یک مدل تحلیلی، توزیع سرعت متوسط عمقی را در طول خم کانال مرکب پیچان مورد بررسی قرار دادند. Liu *et al.* (2016) روشی را برای ارزیابی دبی در کانال مرکب پیچان ارائه دادند. آن‌ها همچنین خصوصیات 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. Shan *et al.* (2017) با ارائه یک مدل تحلیلی به برآورد منحنی دبی-اشل در کانال مرکب پیچان با پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر مستغرق پرداختند. نتایج نشان داد که یک همگرایی خوبی بین داده‌های اندازه-گیری شده و پیش‌بینی شده برقرار است. Shan *et al.* (2018) به پیش‌بینی زاویه مسیر جریان دو بعدی متوسط در امتداد خم پیچان در کانال‌های مرکب پیچان رودی پرداختند. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که ارتفاع سلول جریان ثانویه در کانال اصلی با پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت نسبت به یک کانال بدون پوشش گیاهی افزایش می‌یابد و زاویه مسیر جریان به ارتفاع سلول جریان ثانویه وابسته است. Ayaseh *et al.* (2019) و Salmasi *et al.* (2020) نشان دادند استفاده از مدل CCHE2D به‌عنوان یک روش کاربردی برای بررسی الگوی جریان رودخانه‌ها و مطالعه رسوب و فرسایش در رودخانه‌های دارای بستر شنی مناسب است. Naghavi *et al.* (2019, 2020, 2021) با بررسی عددی مشخصات هیدرولیکی جریان در کانال‌های مرکب پیچان و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی نشان دادند که نرم‌افزار Flow3D و مدل آشفته‌گی RNG دقت بالایی در مدل‌سازی کانال مرکب پیچان دارد. Nikubakht *et al.* (2017) تأثیر پوشش گیاهی غیرمستغرق سیلاب‌دشت را بر روی تغییرات بستر رودخانه‌های ماندردی ملایم با مقطع مرکب را مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که حضور پوشش گیاهی سبب شده است که موقعیت وقوع بیش‌ترین عمق آب‌شستگی در همه طول پیچان رود به سمت قوس خارجی تغییر یابد. Naghavi *et al.* (2022, 2023) اثر آرایش ساختمان‌ها و تراکم ساختمانی یک‌طرفه و دوطرفه را روی شرایط جریان در کانال‌های مرکب پیچان مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که 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 سیلاب‌دشت بیش‌تر از کانال با آرایش موانع سازه‌ای موازی با جریان سیلاب‌دشت است.

با توجه به مخاطرات وقوع سیل در مناطق مسکونی و وجود تراکم‌های سازه‌ای مختلف در حاشیه پیچان رودها، مطالعه اندرکنش جریان‌های سیلابی کانال مرکب پیچان در این مناطق ضروری به نظر می‌رسد. با مرور مطالعات انجام‌شده روی کانال‌های مرکب، در این پژوهش تغییرات پارامترهای هیدرولیکی سرعت، عمق، دبی جریان و تنش برشی بستر در کانال مرکب پیچان با توجه به تغییر تراکم سازه‌ای روی سیلاب‌دشت پس از صحت‌سنجی با داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D محاسبه و ارزیابی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر برای بررسی عددی تأثیر تراکم سازه‌ای سیلاب‌دشت کانال‌های مرکب پیچان روی شرایط هیدرولیکی جریان، از شش نوع کانال با تراکم سازه‌ای مختلف مطابق شکل (۱) و جدول (۱) استفاده شده است. برای مدل‌سازی تراکم سازه‌ای از بلوک‌های غیرمستغرق با مقطع مربعی به ابعاد 7×7 سانتی‌متر مربع استفاده شده است. پلان و مشخصات هندسی

کانال مرکب پیچان مورد استفاده در این تحقیق، در شکل (۲) و جدول (۲) نشان داده شده است. در جدول (۲) برای محاسبه درصد تراکم سازه‌های (Density%)، از تقسیم سطح مقطع مجموعه بلوک‌های مستقر در سیلاب‌دشت به مساحت سیلاب‌دشت استفاده می‌شود. مطابق شکل (۲) شرایط جریان در هفت مقطع مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش دبی و عمق جریان ورودی کلیه کانال‌ها به ترتیب ۰/۱۱۳ متر مکعب بر ثانیه و ۰/۲۱۶ متر می‌باشد. عمق و عرض کانال اصلی مستطیلی نیز به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۷ متر و عرض کانال مرکب پیچان چهار متر می‌باشد.

لازم به ذکر است که نرم‌افزار 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 Liu *et al.* (2014) که در بخش صحت‌سنجی از آن استفاده شده و با توجه به معادله Ackers (1991) که به صورت رابطه (۱) ارائه شده است، مقدار k_s به دست آمده از رابطه (۱) به عنوان ضخامت زبری بستر مورد استفاده قرار گرفت. در رابطه (۱)، n ضریب زبری مانینگ بر حسب $s/m^{1/3}$ و g شتاب گرانش بر حسب m/s^2 می‌باشد.

$$k_s = (8.25n\sqrt{g})^6 \quad \text{رابطه (۱)}$$

Table 1. Structural density and distance between blocks for six cases

Case	Distance between blocks (cm)	Density (%)
A	—	0
B	35	8
C	28	11
D	21	16
E	14	25
F	7	44

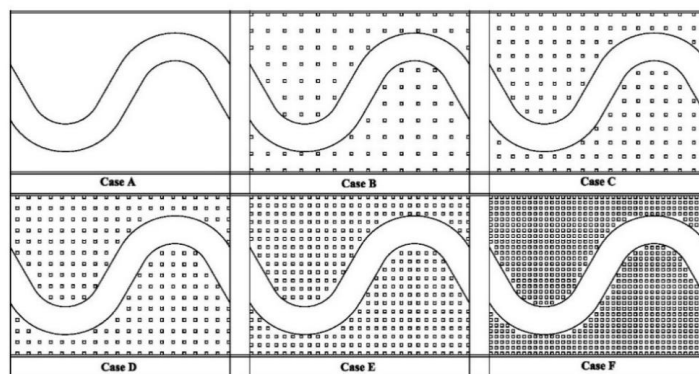


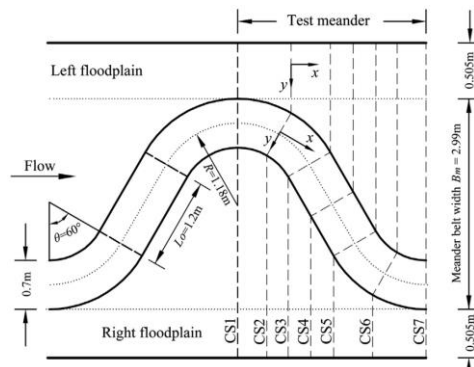
Figure 1. The channels used in this research with different structural densities on the floodplain

۲.۱. مدل‌سازی عددی و معادلات حاکم

معادلات اساسی دینامیک سیالات شامل بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی هستند. با بهره‌گیری از روش دینامیک سیالات محاسباتی، با تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای حاکم بر جریان سیال به معادلات جبری، امکان حل عددی این معادلات فراهم می‌شود. با استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی جهت رسیدن به جواب، دامنه مسئله به تعداد زیادی اجزای کوچک تقسیم شده و برای هر یک از این اجزا مسئله حل می‌شود. در میان تمامی روش‌ها، روش حجم محدود کارایی بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد و بیش‌تر نرم‌افزارهای تجاری در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی نیز بر مبنای این روش بسط و توسعه یافته‌اند.

Table 2. Geometrical parameters used for the meandering compound channel (Liu *et al.*, 2014)

Meander belt width (m)	Wavelength (m)	Inner radius (m)	Outer radius (m)	Cross-over length (m)	Sinuosity
2.99	5.53	0.9	1.6	1.2	1.381

**Figure 2.** Plan of geometrical details and measured sections

یکی از معروفترین نرم‌افزارهای تجاری FLOW3D می‌باشد. معادلات پایه‌ای مورد استفاده در مدل FLOW3D معادلات ناویه-استوکس هستند و از پنج مدل آشفتگی مختلف در حل خصوصیات جریان‌های آشفته استفاده می‌کند و توانایی نمایش تغییرات لحظه‌ای پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند عمق و سرعت در جهات مختلف را داراست. در این پژوهش برای بررسی اثر تراکم سازه‌های سیلاب‌دشت روی مشخصات جریان و تنش برشی بستر کانال مرکب پیچان از نرم‌افزار FLOW3D استفاده شده و مدل آشفتگی نیز طوری انتخاب می‌شود که انطباق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی داشته باشد. با توجه به مطالعات انجام‌شده روی کانال‌های مرکب، مدل آشفتگی RNG دارای انطباق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی بوده، لذا در این پژوهش از این مدل آشفتگی در مدل‌سازی استفاده شده است. همان‌طور که گفته شد، معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله پیوستگی و سه معادله مومنتم در جهت محورهای سه‌گانه مختصات هستند که به معادلات ناویه-استوکس موسوم می‌باشند. این معادلات برای جریان آشفته تراکم‌ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت و در فرم تانسوری با روابط (۲) و (۳) معرفی می‌شوند.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j}) \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، x_i و x_j محورهای مختصات در سیستم کارتزین، t زمان، ρ چگالی سیال، \bar{p} فشار متوسط، U_i و U_j سرعت و $\overline{u'_i u'_j}$ تانسور تنش رینولدز می‌باشند.

هم‌چنین در این پژوهش، برای پیش‌بینی 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 اشغال‌شده توسط سیال به کل حجم می‌باشد، و از روابط (۴) و (۵) به‌دست می‌آید.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[\frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) \right] + \frac{1}{V_f} \left[\frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) + \xi \left(\frac{F A_x u}{X} \right) \right] = FDIF + FSOR \quad \text{رابطه ۴}$$

$$FDIF = \frac{1}{V_f} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u_f A_x \frac{\partial F}{\partial x} + R \frac{\partial}{\partial x} (u_f A_y \frac{\partial F}{\partial y})) \right] + \frac{1}{V_f} \left[\frac{\partial}{\partial z} (u_f A_z \frac{\partial F}{\partial z}) + \xi \left(\frac{F A_x u_f}{X} \right) \right] \quad \text{رابطه ۵}$$

در این روابط، u, v, w مؤلفه‌های سرعت، A_x, A_y, A_z جزء سطحی جریان در جهت 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، چنانچه یک سلول محاسباتی مشخص پر از آب باشد $F=1$ خواهد شد. اگر $F=0$ سلول موردنظر خالی است و اگر $0 < F < 1$ ، سلول موردنظر حاوی هر دو فاز آب و هوا است.

۲.۲. شبکه‌بندی میدان جریان و شرایط مرزی

شبکه حل در این مدل متشکل از سلول‌های مکعبی می‌باشد. برنامه FLOW3D فقط قابلیت تولید شبکه‌های منظم (مکعبی) را دارد، لذا 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 سیلاب‌دشت و به منظور افزایش دقت در نتایج حاصل، باید از شبکه‌بندی ریزتری استفاده گردد. ساختن شبکه مناسب برای میدان حل معادلات، دقت محاسبات، هم‌گرایی و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در کلیه مدل‌های عددی صورت گرفته، برای حصول نتایج درست و منطقی و کاهش خطا و زمان شبیه‌سازی، طبق راهنمای برنامه FLOW3D ابعاد شبکه طوری تعیین شد که نسبت اندازه دو سلول مجاور و نسبت شکل تا حد ممکن نزدیک به یک باشد و حداکثر این دو پارامتر به ترتیب از $1/25$ و ۳ تجاوز نکند. در پژوهش حاضر پس از بررسی شبکه‌بندی‌های مختلف، مطابق جدول (۳) ریزکردن شبکه تا رسیدن به انحنای مناسب در کانال اصلی پیچان و نزدیک شدن به نتایج آزمایشگاهی با سعی و خطاهای متعددی انجام شد.

شرایط مرزی اعمال شده برای مدل عددی به گونه‌ای انتخاب شد که با شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی لیبو و همکاران 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 گردید. این شرایط مرزی در نرم‌افزار FLOW3D معادل شرایط مرزی Volume Flow Rate (نرخ جریان حجمی) می‌باشد. برای شرایط مرزی پایین-دست در شبیه‌سازی حاضر از شرط مرزی Outflow (خروجی) استفاده شد. در این شرط مرزی نیاز به اعمال پارامتر هیدرولیکی خاصی نمی‌باشد. برای اعمال شرایط مرزی در دیوارهای جانبی و کف کانال، از شرط مرزی wall (دیواره) استفاده گردید. کل سطح فوقانی میدان جریان نیز در این مدل‌سازی به صورت شرایط مرزی Symmetry (تقارن) تعریف شد. شرایط مرزی اعمال شده به مدل عددی در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد.

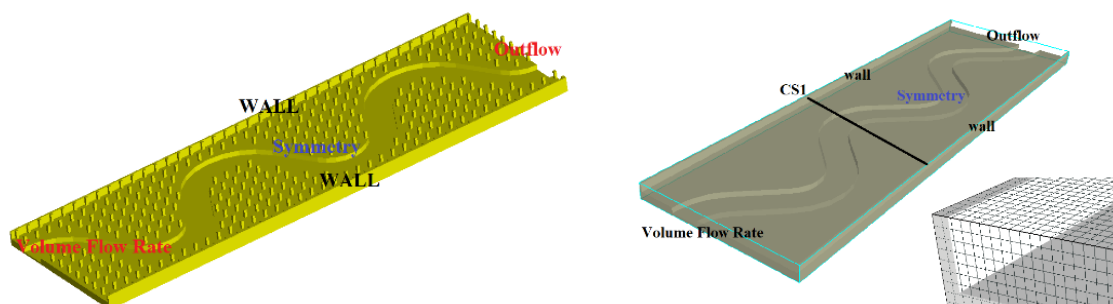


Figure 3. Boundary conditions and meshing of the numerical model

۳.۲. صحت‌سنجی نتایج

برای صحت‌سنجی و کنترل نتایج استخراج شده در پژوهش حاضر، از داده‌های آزمایشگاهی Liu et al. (2014) استفاده گردید. 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 ۰/۱۱۳ مترمکعب بر ثانیه، عمق جریان ۰/۲۱۶ متر و عمق کانال اصلی ۰/۱۴ متر می‌باشد. پلان مشخصات هندسی کانال مورد استفاده جهت صحت‌سنجی در شکل (۴) نشان داده شده است.

با توجه به بررسی مشخصات هیدرولیکی جریان در این پژوهش، داده‌های مربوط به دبی کانال اصلی، سرعت متوسط عمقی در مقطع کانال اصلی برای صحت‌سنجی استفاده گردید. به منظور بررسی میزان دقت نتایج محاسبات مدل عددی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی پس از بررسی شبکه‌بندی‌های مختلف مطابق جدول (۳)، از شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مطابق رابطه (۶) برای مقدار سرعت متوسط عمقی استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - N_i)^2} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این رابطه، E_i و N_i مقادیر داده‌های عددی و آزمایشگاهی و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

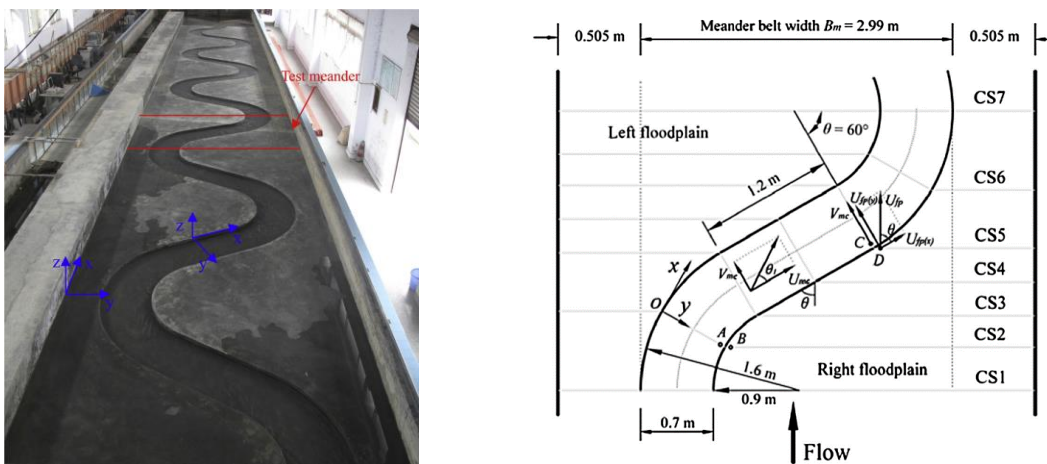


Figure 4. The geometry of the meandering compound channel used in the experiments by Liu *et al.* (2014)

Table 3. The accuracy of different model gridding based on the RMSE of computed depth-averaged velocities and Q_{mc}/Q along the half bend of compound meandering channel

Type of gridding	Grid spacing (cm)	RMSE (ms ⁻¹)							Q_{mc}/Q
		CS1	CS2	CS3	CS4	CS5	CS6	CS7	
Coarse (C)	3	0.114	0.107	0.106	0.101	0.108	0.105	0.117	0.117
Medium (M)	1.5	0.087	0.079	0.079	0.073	0.081	0.078	0.089	0.093
Fine (F)	1	0.052	0.049	0.048	0.047	0.050	0.047	0.053	0.066
Very fine (FS)	0.75	0.052	0.048	0.048	0.046	0.049	0.047	0.052	0.064

با توجه به نتایج جدول (۳)، مشخص می‌شود که مقادیر سرعت متوسط عمقی حاصل از شبیه‌سازی با شبکه‌بندی نوع F در مقاطع مختلف با داده‌های آزمایشگاهی اختلاف ناچیزی دارد. همچنین در استفاده از شبکه‌بندی نوع FS، نتایج حاصل اختلاف بسیار ناچیزی با شبکه‌بندی نوع F دارد که بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت، کاهش ابعاد شبکه به بیش از یک مقدار معین نه تنها موجب بهتر شدن نتایج نمی‌شود بلکه مدت زمان شبیه‌سازی را نیز افزایش می‌دهد. در نهایت با توجه به اختلاف ناچیز نتایج شبکه‌بندی نوع F و FS، از شبکه‌بندی نوع F، با توجه به مدت زمان کمتر محاسبات برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد.

شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب، مقایسه نتایج عددی شبکه‌بندی نوع F با داده‌های آزمایشگاهی سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1 و دبی عبوری از کانال اصلی در مقاطع مختلف را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است نمای دید مقطع عمودی در تمامی نمودارهای استخراج شده بر خلاف جهت حرکت جریان می‌باشد. مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای سرعت متوسط عمقی و دبی عبوری از کانال اصلی به ترتیب ۵/۲ و ۵/۹ درصد می‌باشد.

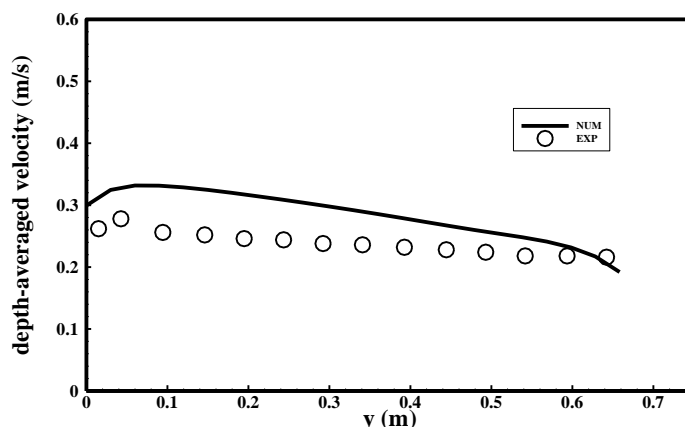


Figure 5. Comparison of experimental and numerical results with F-type grid for depth averaged velocity in CS1 section

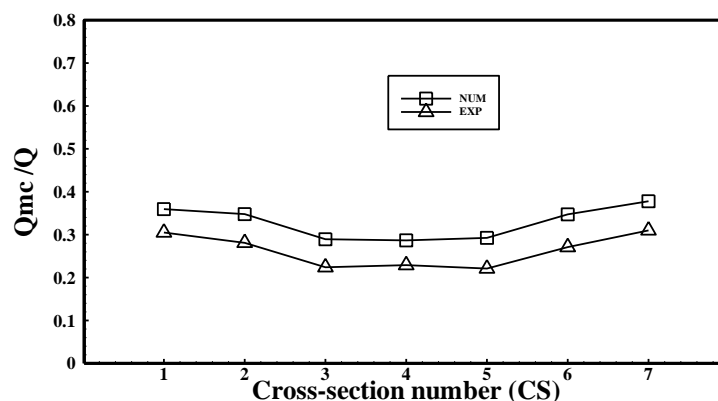


Figure 6. Comparison of experimental and numerical results with F-type grid for flow discharge in different section

۳. نتایج و بحث

۳.۱. توزیع سرعت در کانال اصلی

شکل (۷) توزیع سرعت در مقطع CS1 کانال اصلی را با توجه به تغییر میزان تراکم سازه‌ای در سیلاب‌دشت نشان می‌دهد. در تمامی موارد، حداکثر مقدار سرعت در نزدیکی عمق لبریز کانال (عمق ۱۴ سانتی‌متر) رخ می‌دهد. در کانال A، حداکثر مقدار سرعت در قوس داخلی و در نزدیکی مرز سیلاب‌دشت با کانال اصلی رخ می‌دهد. با افزایش تراکم سازه‌ای روی سیلاب‌دشت، مقدار سرعت حداکثر به سمت مرکز کانال اصلی حرکت کرده و از دیواره فاصله می‌گیرد و بر مقدار آن نیز افزوده می‌شود، به طوری که با افزایش مقدار تراکم سازه‌ای از صفر به ۴۴ درصد، مقدار حداکثر سرعت از ۰/۳۵ به ۰/۵۶ متر بر ثانیه (۶۰ درصد افزایش) تغییر می‌کند.

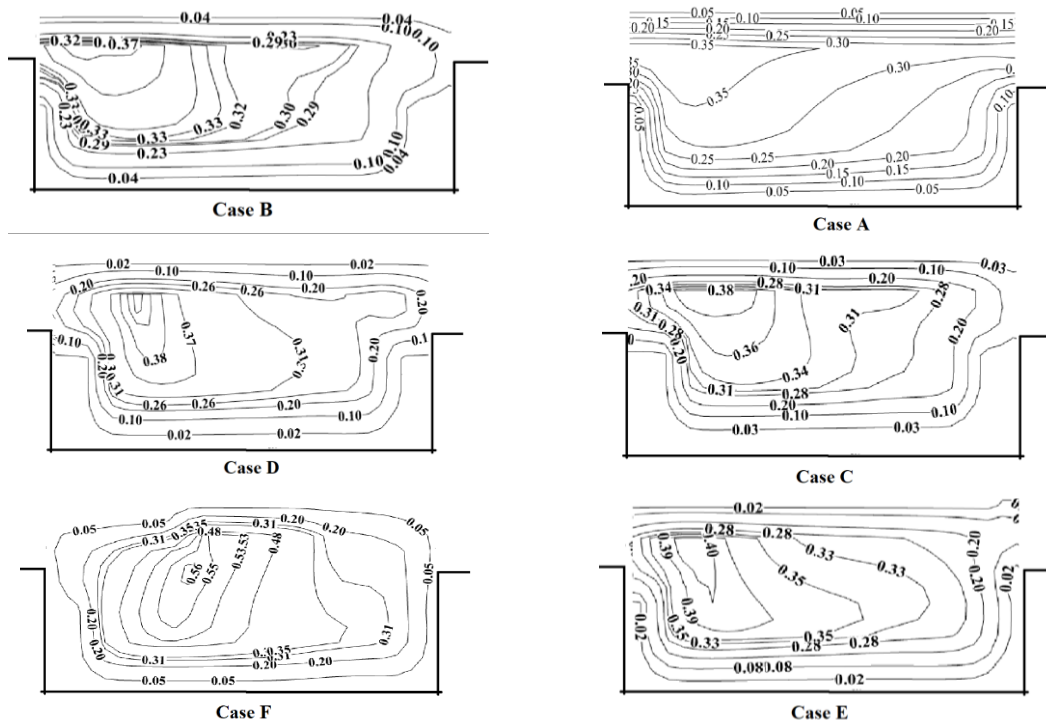


Figure 7. Distribution of flow velocity in CS1 section for cases A to F

۲.۳. تغییرات سرعت متوسط عمقی و سرعت متوسط کلی مقاطع مختلف کانال اصلی

با توجه به توزیع سرعت کانال اصلی مقطع CS1 مطابق شکل (۷)، حداکثر مقدار سرعت در کانال A در نزدیکی قوس داخلی رخ داده و با افزایش تراکم سازه‌ای به سمت مرکز کانال حرکت کرده و افزایش می‌یابد. بنابراین، حداکثر مقدار سرعت متوسط عمقی در کانال اصلی با افزایش تراکم سازه‌ای افزایش می‌یابد. شکل (۸) پروفیل عرضی سرعت متوسط عمقی را با توجه به تغییر تراکم سازه‌ای در مقطع CS1 نشان می‌دهد. در این شکل با افزایش مقدار تراکم سازه‌ای روی سیلاب‌دشت، سرعت متوسط عمقی در سیلاب‌دشت کاهش و مقدار سرعت در کانال اصلی افزایش می‌یابد. شکل (۹) تغییر پروفیل سرعت متوسط عمقی در کانال اصلی را با توجه به تغییر تراکم سازه‌ای نشان می‌دهد. با افزایش مقدار تراکم سازه‌ای از صفر به ۴۴ درصد، مقدار حداکثر سرعت متوسط عمقی از ۰/۳۳ به ۰/۵۴ متر بر ثانیه (۶۴ درصد افزایش) تغییر می‌کند.

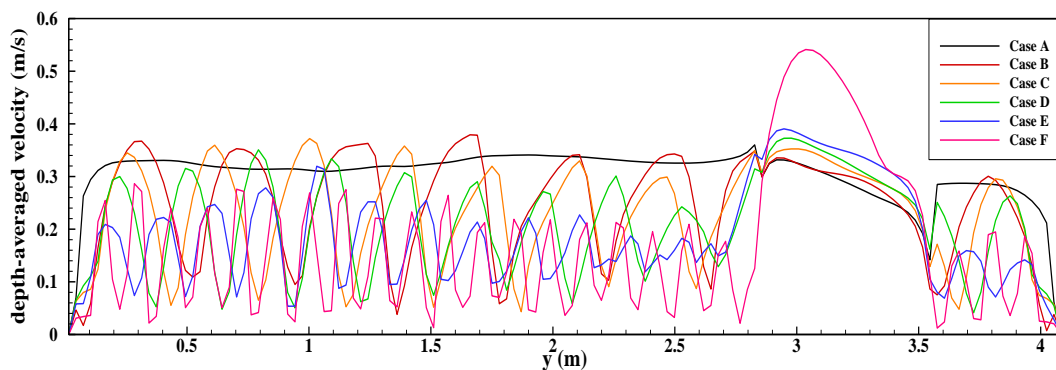


Figure 8. Depth averaged velocity in section CS1 for cases A to F

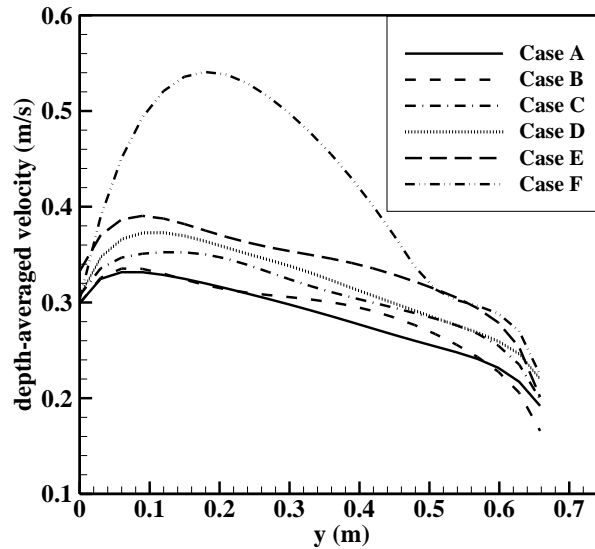


Figure 9. Depth averaged velocity in the main channel of section CS1 for cases A to F

در ادامه سرعت متوسط کلی در کانال اصلی پیچان در هر یک از مقاطع هفت‌گانه CS1 تا CS7 با توجه به تغییر تراکم سازه‌ای روی سیلاب‌دشت محاسبه گردید. در شکل (۱۰) این تغییرات برای هفت مقطع از طول خم پیچان و در شش تراکم سازه‌ای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارها مشخص است با افزایش تراکم سازه‌ای، مقدار سرعت متوسط مقاطع کانال اصلی افزایش می‌یابد. با میانگین‌گیری سرعت متوسط مقاطع مختلف در هر مقدار تراکم سازه‌ای، مشاهده می‌شود که مقدار سرعت متوسط مقطع کانال اصلی با افزایش مقدار تراکم سازه‌ای به‌طور میانگین ۵۱ درصد افزایش یافته است. همچنین مطابق این شکل، مقدار حداقل سرعت متوسط کانال اصلی برای هر تراکم سازه‌ای، در مقطع CS4 رخ می‌دهد.

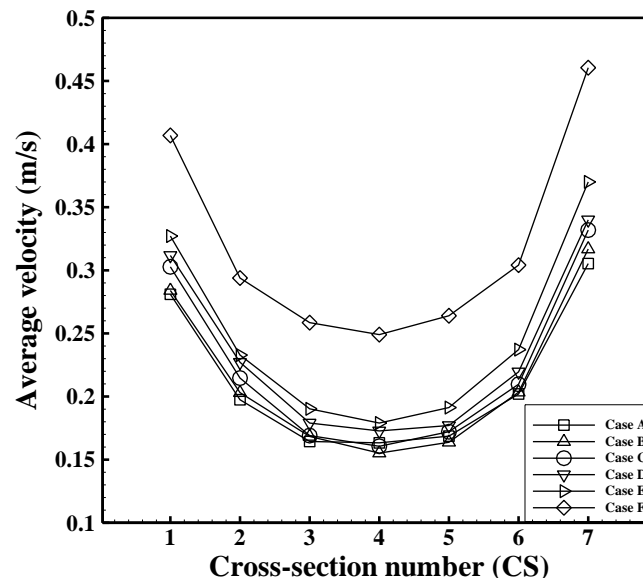


Figure 10. The average velocity of the main channel in sections CS1-7 for cases A to F

۳.۳. پروفیل سطح آزاد آب در کانال A تا F تحت اثر تغییر تراکم سازه‌ای

در یک کانال مرکب پیچان هرچه بر تراکم سازه‌ای افزوده شود، مقاومت جریان افزایش یافته و ارتفاع سطح آزاد آب زیاد می‌شود. شکل (۱۱) پروفیل سطح آزاد آب را با تغییر مقدار تراکم سازه‌ای در مقطع CS1 نشان می‌دهد. در این شکل با افزایش مقدار تراکم سازه‌ای از صفر تا ۴۴ درصد ارتفاع سطح آزاد آب در کانال اصلی و سیلاب‌دشت افزایش می‌یابد. مقدار حداکثر ارتفاع سطح آزاد آب با افزایش مقدار تراکم سازه‌ای در کانال A تا F، از ۰/۲۱۱ به ۰/۲۶۳ متر (۲۵ درصد افزایش) در خم خارجی مقطع کانال اصلی CS1 تغییر می‌کند. شکل (۱۲) و جدول (۴) میزان افزایش سطح آب را با توجه به افزایش تراکم سازه‌ای را در هر مرحله نسبت به کانال A نشان می‌دهد.

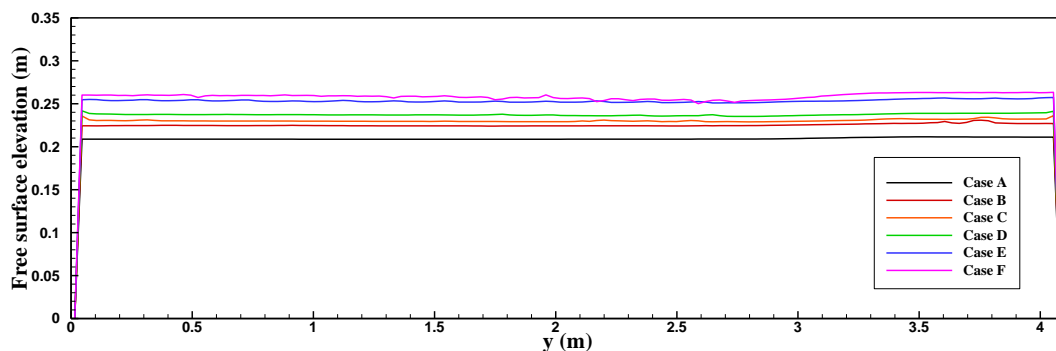


Figure 11. Free surface elevation in section CS1 for cases A to F

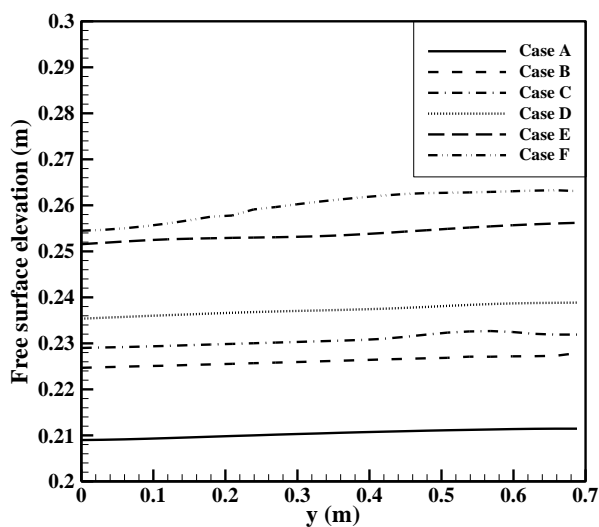


Figure 12. Free surface elevation in the main channel of section CS1 for cases A to F

Table 4. The amount of water surface increase due to the increase in structural density for cases A to F

Case	Distance between blocks (cm)	Density (%)	Increasing the height of water surface compared to case A (%)
A	-	0	0
B	35	8	8
C	28	11	10
D	21	16	13
E	14	25	21
F	7	44	25

۴.۳. میزان دبی عبوری از کانال اصلی

در ادامه، میزان دبی عبوری از هر مقطع کانال اصلی با توجه به تغییر میزان تراکم سازه‌های کانال مرکب پیچان محاسبه گردید. در شکل (۱۳) این میزان تغییرات براساس نسبت دبی عبوری از کانال اصلی به دبی کل نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود با افزایش مقدار تراکم سازه‌های از صفر به ۴۴ درصد، مقدار دبی عبوری از کانال اصلی افزایش می‌یابد.

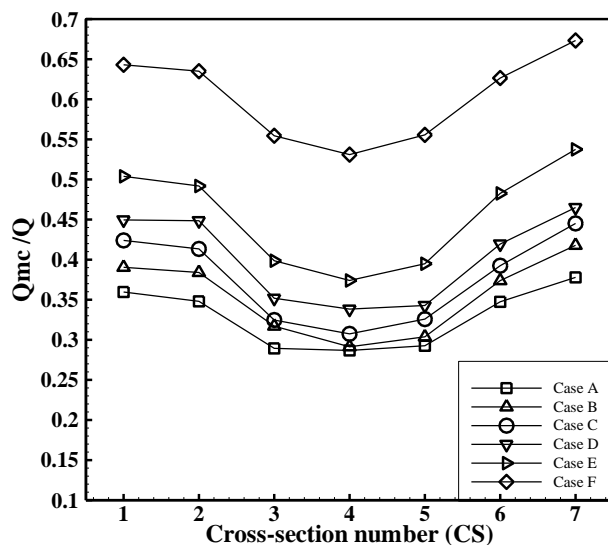


Figure 13. The ratio of main channel discharge (Q_{mc}) to total discharge (Q) along half of a meander

با افزایش تراکم سازه‌های روی سیلاب‌دشت، دبی عبوری از روی سیلاب‌دشت کاهش یافته و به‌ناچار مجبور می‌شود از مقطع کانال اصلی عبور کند. بنابراین میزان دبی عبوری از کانال اصلی نسبت به دبی کل افزایش می‌یابد. در مقاطع میانی (CS2-CS6)، جریان عرضی سیلاب‌دشت بالادست در کانال اصلی پیچان 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 CS7 کاهش می‌یابد. Liu *et al.* (2016). علاوه بر این با توجه به افزایش زاویه جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت در مقاطع میانی، اثر مؤلفه افقی جریان سیلاب‌دشت روی کانال اصلی بیش‌تر می‌شود. به‌عنوان نمونه، برای کانال مرکب پیچان با مقدار ضریب خمیدگی $1/381$ مطابق شکل (۴) با حرکت در طول خم، مقدار مؤلفه افقی جریان سیلاب‌دشت ($U_{fp}\sin\theta=U_{fp}(y)$) با توجه به افزایش مقدار زاویه θ ، افزایش یافته (در $CS3$ ، 4.5 زاویه θ برابر 60° درجه می‌باشد) و باعث تأثیر روی جریان ثانویه و تغییر دبی عبوری از کانال اصلی می‌شود. با توجه به شکل (۱۳)، بزرگ‌ترین دبی کانال اصلی همیشه در تاج خم پیچان رخ داده (CS1,7) درحالی‌که کوچک‌ترین دبی کانال اصلی اغلب در مقطع میانی رخ می‌دهد (CS4). در ادامه میزان دبی عبوری متوسط‌گیری‌شده در مقاطع کانال اصلی (Q_{mc}) و سیلاب‌دشت (Q_{fp}) در جدول (۵) برای مقادیر تراکم سازه‌های مختلف نشان داده شده است. درصد نشان داده‌شده در پرانتز، نسبت دبی کانال اصلی (Q_{mc}) یا دبی سیلاب‌دشت (Q_{fp}) به دبی کل عبوری Q می‌باشد. همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار تراکم سازه‌های روی سیلاب‌دشت از صفر به ۴۴ درصد، میزان دبی متوسط عبوری از مقطع کانال اصلی، از 0.37 به 0.68 مترمکعب بر ثانیه افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش ۸۴ درصدی دبی در مقطع کانال اصلی است.

Table 5. Main channel discharge (Q_{mc}), floodplain discharge and total discharge (Q) for cases A to F

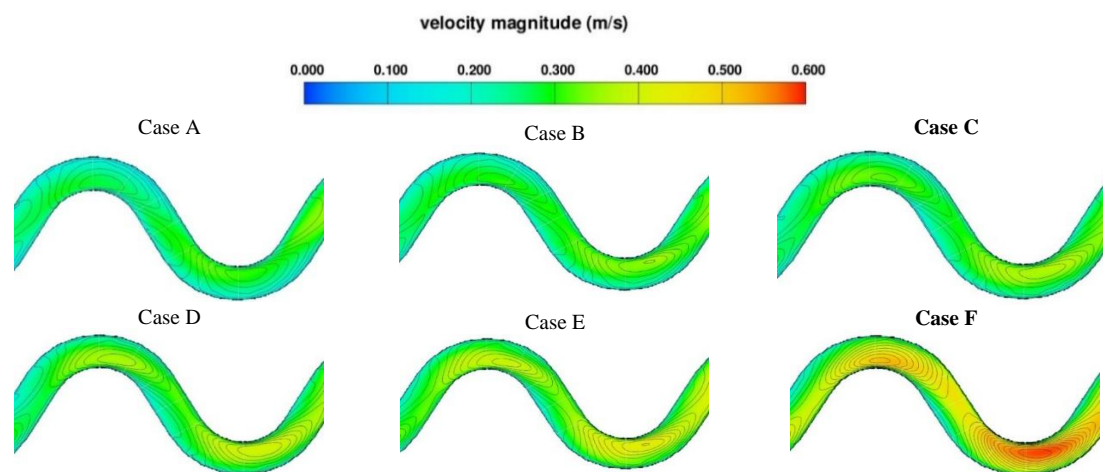
Case	Density (%)	Q (m^3/s)	Q_{mc} (m^3/s)	Q_{fp} (m^3/s)
A	0	0.113	0.037 (33%)	0.076 (67%)
B	8	0.113	0.04 (35%)	0.073 (65%)
C	11	0.113	0.043 (38%)	0.07 (62%)
D	16	0.113	0.045 (40%)	0.068 (60%)
E	25	0.113	0.051 (45%)	0.062 (55%)
F	44	0.113	0.068 (60%)	0.045 (40%)

۵.۳. توزیع سرعت جریان و تنش برشی در نزدیکی بستر کانال اصلی

در شکل (۱۴) توزیع سرعت در نزدیکی بستر کانال اصلی برای شش مورد کانال A تا F با تراکم سازه‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص شده است حداکثر مقدار سرعت در کانال A در قوس داخلی رخ داده و با افزایش میزان تراکم سازه‌ای از دیواره قوس داخلی فاصله گرفته و به سمت مرکز کانال حرکت کرده و افزایش می‌یابد.

طبق مطالعات انجام‌شده، توزیع تنش برشی مرزی در طول محیط خیس‌شده تابع عواملی از قبیل شکل مقطع، زبری و شدت جریان ثانویه می‌باشد. با توجه به تغییر تراکم سازه‌ای روی سیلاب‌دشت، مقادیر زبری، شدت جریان ثانویه و سرعت جریان کانال اصلی تغییر کرده و به‌دنبال آن تنش برشی بستر تغییر می‌کند. در این بخش توزیع تنش برشی در بستر کانال اصلی برای شش مورد کانال A تا F با تراکم سازه‌ای مختلف مطابق شکل (۱۵) نشان داده شده است.

همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص شده، در هر یک از کانال‌ها، تنش برشی بستر در قوس داخلی بیش‌تر از قوس خارجی می‌باشد و با افزایش مقدار تراکم سازه‌ای در کانال مرکب پیچان، به میزان تنش برشی بستر افزوده می‌شود. در هر یک از کانال‌ها، حداکثر مقدار تنش برشی بستر در قوس داخلی مقاطع CS1,7 رخ می‌دهد. مطابق شکل (۱۶)، در مقطع CS1 کانال اصلی، با افزایش تراکم سازه‌ای روی سیلاب‌دشت از صفر به ۴۴ درصد، مقدار حداکثر تنش برشی بستر از $1/32$ به $4/61$ پاسکال (۲۵۰ درصد افزایش) تغییر کرده و به سمت مرکز کانال اصلی حرکت می‌کند. افزایش چند برابری تنش برشی بستر در این حالت می‌تواند منجر به تشدید فرسایش بستر رودخانه در شرایط سیلابی گردد. تداوم این وضعیت بحرانی می‌تواند تبعات منفی از قبیل تخریب دیواره‌های کناری رودخانه؛ دیواره‌های حفاظتی، آب‌شکن‌ها و سایر سازه‌های هیدرولیکی موجود در کناره رودخانه را به‌همراه داشته باشد.

**Figure 14.** Flow Velocity distribution near the main channel bed for cases A to F

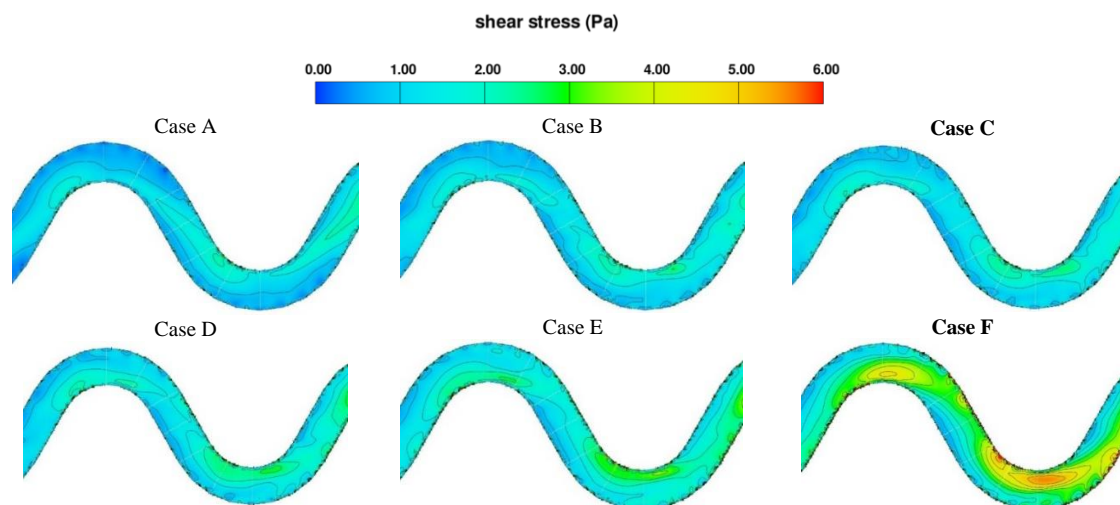


Figure 15. Shear stress distribution near the main channel bed for cases A to F

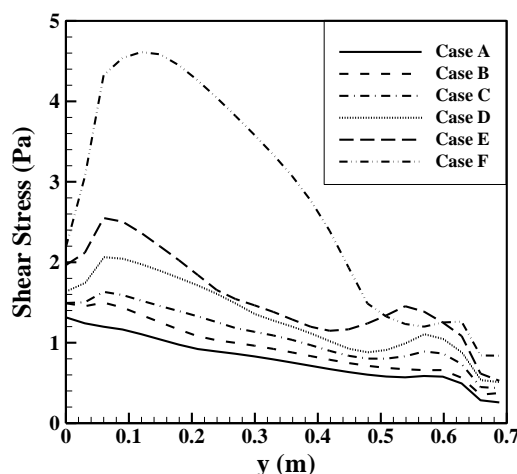


Figure 16. Bed shear stress in section CS1 for cases A to F

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب پیچان تحت اثر تغییر تراکم سازه‌ای با استفاده از مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل به شرح زیر است:

- با افزایش میزان تراکم سازه‌ای روی سیلاب‌دشت، ضمن افزایش مقاومت جریان، مقدار سرعت حداکثر در کانال اصلی افزایش یافته و از دیواره قوس داخلی فاصله گرفته و به سمت مرکز کانال اصلی حرکت می‌کند، به طوری که با افزایش مقدار تراکم سازه‌ای از صفر به ۴۴ درصد، مقدار حداکثر سرعت از ۰/۳۵ به ۰/۵۶ متر بر ثانیه (۶۰ درصد افزایش) تغییر می‌کند.

- با افزایش میزان تراکم سازه‌ای روی سیلاب‌دشت، مقدار سرعت متوسط مقطع کانال اصلی به طور میانگین ۵۱ درصد افزایش می‌یابد.

- مقدار حداکثر ارتفاع سطح آزاد آب با افزایش مقدار تراکم سازه‌ای در کانال A تا F، از ۰/۲۱۱ به ۰/۲۶۳ متر (با ۲۵ درصد افزایش) در خم خارجی مقطع CS1 تغییر می‌کند.

- با افزایش مقدار تراکم سازه‌ای روی سیلاب‌دشت از صفر به ۴۴ درصد، میزان دبی متوسط عبوری از مقطع کانال اصلی، از ۰/۳۷ به ۰/۶۸ مترمکعب بر ثانیه افزایش می‌یابد که می‌توان گفت این مقدار دبی ۸۴ درصد افزایش یافته است.

- تنش برشی بستر در قوس داخلی بیش‌تر از قوس خارجی می‌باشد و با افزایش مقدار تراکم سازه‌ای در کانال مرکب پیچان، به میزان تنش برشی بستر افزوده می‌شود. در مجموع با افزایش میزان تراکم سازه‌ای روی سیلاب‌دشت در کانال A تا F، مقدار حداکثر تنش برشی بستر از ۱/۳۲ به ۴/۶۱ پاسکال (۲۵۰ درصد افزایش) تغییر کرده و به سمت مرکز کانال اصلی حرکت می‌کند.

۵. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶. منابع

- Ayaseh, A., Salmasi, F., Hossienzade Dalir, A., & Arvanaghi, H. (2019). A performance comparison of CCHE2D model with empirical methods to study sediment and erosion in gravel-bed rivers. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 7933-7942.
- Da Silveira e Lorena, M. L. (1992). *Meandering compound flow*. Ph.D. Thesis, University of Glasgow, UK.
- De Marchis, M., & Napoli, E. (2008). The effect of geometrical parameters on the discharge capacity of meandering compound channels. *Advances in Water Resources*, 31(12), 1662-1673.
- Kiely, G. (1990). Overbank flow in meandering channels the important mechanisms. *International Conference on River Flood Hydraulics*, 17-20 September, Wallingford, England, 207-217.
- Knight, D. W., & Demetriou, J. D. (1983). Flood plain and main channel flow interaction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(8), 1073-1092.
- 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.
- 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.
- 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.
- Mushatet, K. S. (2011). Simulation of turbulent flow and heat transfer over a backward-facing step with ribs turbulators. *Thermal Sci*, 15(1), 245-255.
- Naghavi, M., Mohammadi, M. A., & Mahtabi, G. (2019). Flow Velocity in Meandering Compound Channel under the Influence of Sinusoidal Change. *Modares Civil Engineering journal*, 19(5), 208-219. (In Persian).
- Naghavi, M., Mohammadi, M., & Mahtabi, G. (2020). Turbulence Intensity and Boundary Shear Stress in Meandering Compound Channel under the Influence of Sinusoidal Changes. *Journal of Modeling in Engineering*, 18(60), 53-69. (In Persian).
- Naghavi, M., Mohammadi, M., & Mahtabi, G. (2021). Numerical simulation of flow velocity distribution and shear stress in meandering compound channels. *Iranian Water Researches Journal*, 15(1), 23-34. (In Persian).
- Naghavi, M., Mohammadi, M., & Mahtabi, G. (2021). Transverse Flow Characteristics in the Meandering Compound Channels. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(8), 3499-3516. (In Persian).
- Naghavi, M., Mohammadi, M., & Mahtabi, G. (2021). On the effect of relative flood depth on flow hydraulics in meandering compound channels. *Irrigation and Water Engineering*, 11(3), 55-78. (In Persian).
- 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.
- Naghavi, M., Mohammadi, M., & Mahtabi, G. (2023). The effect of building arrangement on the flow characteristics in meandering compound channels. *Journal of Environmental Management*, 331, 117288.

- Naghavi, M., Mohammadi, M., Mahtabi, G., & Abraham, J. (2023). 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.
- Nikubakht, E., Hamidifar, H., & Keshavarzi, A. (2017). Effect of Floodplain Non-Submerged Vegetation on Bed Variation in Meandering Compound Rivers. *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 5(2), 461-470. (In Persian)
- Salmasi, F., Ayaseh, A., Dalir, A. H., & Arvanaghi, H. (2020). Flow pattern study in Beshar River and its two straight and meander reaches using CCHE2D model. *Applied Water Science*, 10(1), 1-15.
- Sellin, R. H. J., & Willetts, B. B. (1996). *Three-Dimensional Structures, Memory and Energy Dissipation in Meandering Compound Channel Flow, Floodplain Processes*. Chichester, England, John Wiley & Sons.
- 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.
- 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.
- Spooner, J., & Shiono, K. (2003). Compound Meandering Channels with overbank flow. *Water and Maritime Engineering*, 156(3), 225-233.
- Toebes, 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.
- Yang, K., Cao, S., & Knight, D. W. (2007). Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Eng*, 133(2), 148-159.