



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۲ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۱

صفحه‌های ۶۴۳-۶۲۹

DOI: 10.22059/jwim.2022.342521.986

مقاله پژوهشی:

شبیه‌سازی عددی اثر هم‌پوشانی پوشش گیاهی صلب در کانال روباز مستقیم با استفاده از OpenFOAM

کمیال صامت^۱، میرعلی محمدی^{۲*}، خسرو حسینی^۳، سعید فرزین^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳. دانشیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۳

چکیده

در این پژوهش به منظور درک مکانیسم الگوی جریان در کانال‌های دارای پوشش گیاهی، به بررسی عددی جریان در یک کانال مستطیلی با نرم‌افزار OpenFOAM پرداخته شد. ابتدا از دو حلگر این نرم‌افزار (icoFoam و pimpleFoam) برای محاسبه پروفیل‌های سرعت در هر دو جهت طولی و عرضی برای چهار مقطع منتخب در کانال مستطیلی با یک استوانه مربعی شکل استفاده شد. از مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های موجود، حلگر icoFoam با عملکرد بهتر (خطای شش درصد) برای مدل توسعه‌یافته بعدی انتخاب گشت. سپس مدل جدید با دو استوانه مربعی شکل دوطبقه با نسبت فاصله ۲/۵ و پنج ایجاد شد. الگوهای جریان، توزیع سرعت و ویژگی‌های فشار در کانال با سرعت‌های جریان ورودی متفاوت برای این دو مورد بررسی شدند. مشاهده شد که یک اختلال در میدان جریان در تمام شبیه‌سازی‌ها رخ داده و جریان از حالت دایمی به حالت غیردایمی، در یک سرعت بحرانی، تغییر کرد. این حالت ناپایداری در فاصله بین استوانه‌ها برای نسبت فاصله پنج در عدد رینولدز متوسط هشت روی داد، در حالی که برای نسبت فاصله ۲/۵ در عدد رینولدز متوسط ۳۲ دیده شد. حداکثر مقادیر جدول‌های زمانی سرعت‌های طولی و عرضی در دوره ۲۰۰ ثانیه‌ای برای چهار حالت (شامل دو عدد رینولدز و دو نسبت فاصله مختلف) در دو محدوده مکانی ترسیم و به‌طور کامل بررسی شد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که هم‌پوشانی نقش مهمی بر ویژگی‌های جریان در آرایش‌های دوطبقه دارد و با افزایش ۵۵ درصدی نسبت فاصله بین استوانه‌ها، مقدار سرعت بحرانی ۷۴ درصد کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: پوشش گیاهی صلب دوطبقه، سرعت بحرانی، کانال مستقیم، مدل‌سازی عددی، نسبت فاصله، OpenFOAM.

A numerical simulation of overlay effect of rigid vegetation in a straight open channel by OpenFOAM

Komeil Samet¹, Mirali Mohammadi^{2*}, Khosrow Hosseini³, Saeed Farzin³

1. Ph.D. Student, Department of Water Eng., & Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2. Associate Professor, Department of Civil Engineering (Water and Hydraulic Structures), Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, (corresponding author)

3. Associate Professor, Department of Water Eng., & Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Received: May 03, 2022

Accepted: August 21, 2022

Abstract

In order to understand the mechanism of flow patterns in vegetated channels, the flow located in a rectangular channel was numerically investigated by using OpenFOAM software. Firstly, two solvers of that software (i.e. *icoFoam* and *pimpleFoam*) were used to calculate the velocity profiles in both longitudinal and cross-sectional directions for four selected sections in a rectangular channel with a square cylinder. By comparing the simulation results with the available data, the *icoFoam* solver with a better performance (six Percent Error) was selected for the next developed model. A new model was then created with two tandem square cylinders with spacing ratios of two and a half and five. Flow patterns, velocity distribution and pressure characteristics in the channel with different inlet flow velocities were investigated for two cases. It was observed that a flow field disturbance occurred in all simulations and the current changed from steady state to unsteady one at a critical velocity. This instability occurred in a distance between the cylinders for the spacing ratio of five at an average Reynolds number of eight, while for the ratio of two and a half it is occurred at an average Reynolds number of 32. The maximum values of longitudinal and transverse velocity timelines in a period of 200 seconds for four states (including two Reynolds numbers and two different spacing ratios) were plotted in two spatial ranges and fully investigated. According to the results, it can be said that the overlap has an important role on the flow characteristics in tandem arrangements and by increasing the distance ratio between the cylinders by 55 percent, the critical velocity value decreases by 74 percent.

Keywords: Critical Velocity, Numerical Modelling, OpenFOAM, Spacing Ratio, Straight Channel, Tandem Rigid Vegetation.

مقدمه

جریان‌های رودخانه‌ای با پوشش گیاهی در طبیعت بسیار رایج هستند (Kang, 2013). ساختار جریان و ژئومورفولوژی رودخانه‌ها به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر الگوهای پوشش گیاهی است (Anjum & Tanaka, 2019). برنامه‌های احیای رودخانه و مهندسی زیستی اغلب از پوشش گیاهی برای تثبیت سواحل رودخانه‌ها، رسوب‌زایی، کنترل تلفات خاک و آب و بازگرداندن پوشش گیاهی کاشته‌شده در آبراه و دشت سیلابی، افزایش مقاومت کلی جریان و کاهش تنش برشی اعمال‌شده به بستر استفاده می‌کنند (Lopez & Garcia, 2001; Ghisalberti & Nepf, 2002; Zhang et al., 2010; Vojoudi et al., 2020a, 2020b). رشد پوشش گیاهی در مرزهای کانال‌ها و دشت‌های سیلابی آثار مهمی بر میزان جریان، پروفیل‌های عمودی سرعت، رژیم آشفتگی و زبری هیدرولیکی دارد (Curran & Hession, 2013)؛ می‌توان مشاهده کرد که جریان اطراف یک استوانه تکی یا گروهی از استوانه‌ها، یک پدیده کلاسیک مکانیک سیالات می‌باشد. ماهیت جریان عبوری از موانع استوانه‌ای بسیار پیچیده است و مفهوم مهندسی بزرگی دارد (Perumal et al., 2012). بنابراین برای بررسی و شناخت دقیق مکانیسم اثر پوشش گیاهی در ساختار جریان در یک کانال، ابتدا باید آن را به‌صورت کانالی ساده با چند عنصر در نظر گرفته و سپس تعامل آن عناصر با جریان سیال در کانال بررسی شود. Wu et al. (2020) در کار آزمایشگاهی خود به این نتیجه رسیدند که شیب سطح آب و سرعت، افت سطح و شیب هیدرولیکی در منطقه با پوشش گیاهی رابطه نزدیکی با ترکیب، تراکم و قطر پوشش گیاهی دارد. در دهه‌های گذشته، تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (CFD) به‌طور گسترده برای تعیین جریان سیال در اطراف یک استوانه دایره‌ای در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Richardson & Panchang, 1998; Ali & Karim, 2002).

بسیاری از پژوهش‌های تجربی و عددی بر روی میدان جریان، ضریب درگ^۲ و نسبت انسداد^۳ استوانه‌های دایره‌ای و مربعی انجام شده است (Park et al., 1998; Nakagawa & Kharlamov, 2012; et al., 1999; Lam et al., 2003; Dupuis et al., 2016). برخی از این مطالعات تنها بر یک استوانه متمرکز شده‌اند (Sumer & Fredsøe, 1997; Cao & Tamura, 2008; Butt & Egbers, 2013). پژوهش‌های دیگر فقط به جریان‌های آرام می‌پردازند (Park et al., 1998; Rajani et al., 2009; Gera et al., 2010; Bai & Li, 2011; Kozlov et al., 2011) و برخی نیز بر جریان‌های آشفتنه متمرکز شده‌اند (Cao & Tamura, 2008; Ong et al., 2009; Butt & Egbers, 2013). با بررسی عددی جریان دو بعدی (2D) در اطراف یک استوانه، Reichi et al. (2005) این مسئله را در عدد رینولدز^۴ Re ۱۸۰ و نسبت شکاف بین یک‌دهم و پنج‌مورد مطالعه قرار داد، در حالی که Rajani et al. (2013) به‌طور عمده بر جریان آرام غیردایمی گذرنده از یک استوانه دایره‌ای در یک کانال متمرکز شد. Gao et al. (2019) شبیه‌سازی‌های عددی دوبعدی جریان عبوری از شش سیلندر را با Re پایین انجام دادند و بسته به نسبت فاصله، چهار رژیم جریان برخاستگی^۵ را شناسایی کردند. برخی از پژوهش‌گران (Duraõ et al., 1991; Kumar & Ray, 2018; Cao et al., 2020)، یک شبیه‌سازی عددی برای جریان عبوری از استوانه مربعی شکل قرار گرفته در یک محیط بسته را انجام داده و یک مسئله عددی مهم را در شبیه‌سازی جریان‌های با اعداد رینولدز بالای گذرنده از یک بدنه دوبعدی را بررسی کردند و برخی از پژوهش‌گران دیگر برای حل چنین مسئله‌ای با استفاده از روش لاتیس بولتزمن^۶ (LBM)، منطقه لایه برشی و منطقه نزدیک به برخاستگی اطراف سیلندر را تحلیل کردند (Perumal et al., 2012; Adee et al., 2018; Sarwar Abbasi et al., 2018). هم‌چنین برخی از پژوهش‌گران در شبیه‌سازی‌های خود از

با خواص سیال ثابت، در این مدل توسعه‌یافته در نظر گرفته شد. جریان بر روی دو استوانه مربعی شکل بلند به‌طور متقارن توسط دو دیوار موازی محدود می‌باشد. مسئله در شکل (۲) نشان داده شده است.

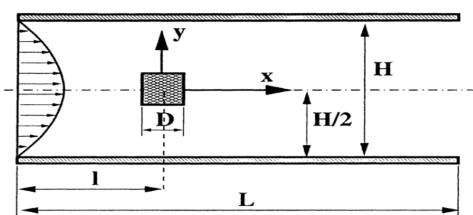


Figure 1. Definition plan of the first primitive geometry (after Breuer *et al.*, 2000)

همان‌طورکه در شکل (۲) مشاهده می‌شود، سرعت جریان به‌عنوان یک شرط مرزی دیریشله^۱ در ورودی بالادست با سرعت یکنواخت که با U_{in} (m/s) نشان داده شده است، توصیف می‌شود. همان‌گونه که در ادامه توضیح داده می‌شود مقدار سرعت یک (m/s) برای U_{in} فقط برای قسمت اول شبیه‌سازی بوده و برای قسمت دوم متغیر می‌باشد. در خروجی پایین‌دست، از شرط مرزی گرادین صفر برای سرعت استفاده شد. دو استوانه مربعی شکل هم‌اندازه متوالی با طول اضلاع (D) در جهت عمود بر جهت جریان قرار دارند. فرض شد که در دیواره‌های کانال و سیلندر، جریان در نزدیک‌ترین گره به دیوار، از قانون دیوار^{۱۱} پیروی می‌کند، در واقع شرط مرزی بدون لغزش ($U=V=0$) روی سیلندرها و دیواره‌های کانال در نظر گرفته شد.

تمام ابعاد با طول اضلاع استوانه مربعی شکل (D) مقیاس‌بندی شد. مجرا برای پنج D بالادست استوانه اول و برای $15 D$ پایین‌دست استوانه دوم گسترش یافت. به‌منظور بررسی اثر نسبت فاصله یا اثر هم‌پوشانی، استوانه‌ها در مرکز کانال با فواصل $G=5D$ و $G=2.5D$ قرار گرفته‌اند. فاصله عمودی بین مرزهای بالا و پایین (H) برابر با $20 D$ است.

نرم‌افزار متن‌باز (OpenFOAM) کمک گرفته‌اند (Gamet *et al.*, 2020).

از بررسی پیشینه پژوهش‌های فوق می‌توان استنباط کرد که از منظر کاربردی، سازه‌های دارای موانع با مقطع مربعی شکل نسبت به ویژگی‌های جریان، بسیار حساس هستند. جریان اطراف چنین سازه‌هایی از جنبه‌های مختلف مانند مکانیسم ساختار جریان، تغییرات نیروهای ناشی از جریان و ... با سطح مقطع دایره‌ای متفاوت است. از سوی دیگر، نسبت فاصله یکی از مهم‌ترین پارامترهای موردتوجه واقع شده توسط برخی پژوهش‌گران می‌باشد، اما تأثیر آن روی پارامترهای جریان، به‌طور کامل بررسی نشده است. از نوآوری‌های این پژوهش استفاده از نرم‌افزار متن‌باز OpenFOAM برای ارزیابی نتایج مدل آزمایشگاهی می‌باشد که دلیل این انتخاب، قدرتمند بودن نرم‌افزار و امکان تغییر کدهای آن به تناسب نیاز است. بنابراین در این مطالعه اثر هم‌پوشانی^۷ نسبت فاصله بین استوانه‌های مربعی شکل صلب، که به‌ترتیب دوپشته^۸ (درست در پشت سر هم و در یک امتداد) قرار گرفته‌اند به‌صورت عددی بررسی شد و هم‌چنین برای ارزیابی بهتر از نمودارهای زمانی سرعت استفاده شد.

مواد و روش‌ها

پیکربندی هندسی مدل اولیه

یک کانال مستطیل شکل با طول (L) پنج متر، عرض (H) هشت‌دهم متر و یک استوانه مربع با طول (D) یک‌دهم متر واقع در $1/25$ متری از پایین‌دست ورودی کانال (I) در وسط سطح مقطع کانال به‌عنوان مدل اولیه در نظر گرفته شد که در شکل (۱) نشان داده شده است.

پیکربندی هندسی و شرایط مرزی مدل توسعه یافته

یک جریان ویسکوزی^۹ (چسبناک) تراکم‌ناپذیر دو بعدی

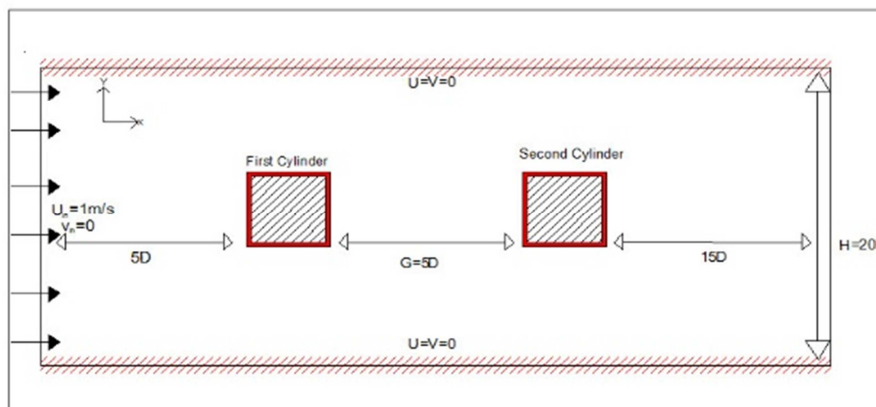


Figure 2. A geometric configuration of computational domain with boundary conditions

ساختار شبکه و مش

از فایل *blockMeshDict* (موجود در خود نرم افزار OpenFOAM) برای تولید هندسه و مش بندی حوزه های محاسباتی حاضر استفاده شد. کل حوزه محاسباتی به هشت (برای حالت اول) و ۱۳ (برای حالت دوم) بلوک مستطیلی غیریکنواخت با شکل سلول شش وجهی و حالت درجه بندی ساده تقسیم شد. به دلیل وجود استوانه ها و تأثیر آنها بر جریان، شبکه ای غیریکنواخت نیز در اطراف استوانه ها ساخته شد. اگرچه شبیه سازی های تولید شده در حالت دو بعدی هستند، اما در برنامه OpenFOAM همه هندسه ها باید به صورت سه بعدی تولید شوند. بنابراین، بلوک های فرعی مکعبی شکل هستند و از آنجایی که فقط یک جزء در جهت Z دارند، مستطیل نامیده می شوند. به عنوان نمونه تعداد نقاط موجود در مش یک سانتی متری برابر ۵۸۳۶۸ عدد، تعداد سلول ها برابر ۲۸۸۰۰ عدد، تعداد صفحه ها برابر ۱۱۵۵۸۵ عدد و تعداد صفحات داخلی برابر ۵۷۲۱۵ عدد می باشد.

نسبت گستردگی سلولی برای هر جهت در بلوک به گونه ای تنظیم شد که در نزدیکی مرزها نازک تر شده و با فاصله گرفتن از مرز درشت تر باشند. برای حل مسئله لازم است تضمین شود که انتقال اطلاعات از انتقال فیزیکی پیشی^{۱۲} نمی گیرد، در غیر این صورت طرح حل

قادر به دسترسی به اطلاعات مورد نیاز به منظور شکل دادن به راه حل نخواهد بود. معیار فوق به عنوان شرط کورانت-فردریش-لوی^{۱۳} (CFL) شناخته می شود و شرط لازم برای همگرایی است و به آن عدد کورانت^{۱۴} (Co) می گویند که یک عدد بدون بعد است و باید کم تر یا مساوی یک باشد (Haddadi *et al.*, 2018; Greenshields, 2019). بنابراین، در کار پژوهشی حاضر، عدد کورانت برای همه شبیه سازی ها کم تر از یک نگه داشته شد. این عدد بی بعد برای یک سلول به صورت زیر تعریف می شود:

$$Co = \delta t |U| \delta x \quad (1)$$

که در آن، δt گام زمانی، $|U|$ مقدار سرعت در آن سلول و δx اندازه سلول در جهت سرعت جریان است. در ادامه سه اندازه مش مختلف یک، دو و پنج سانتی متری برای شبیه سازی بررسی شد و از آنجایی که بزرگ تر بودن اندازه مش ها باعث بروز نتایج ضعیف تر شده و از طرفی مش های ریزتر هم فقط باعث افزایش زمان محاسباتی شده و تأثیر چندانی در دقت محاسبات نداشت، از این رو اندازه دو سانتی متر با عملکرد بهتر و زمان محاسباتی کم تر انتخاب شد.

معادلات اساسی جریان

تعریف نسبت انسداد که توصیف کننده نسبت کناره

که در آن، F فرکانس گردابی سایه $[1/s]$ است که توسط تبدیل فوریه سریع 18 (FFT) تاریخچه زمانی 19 ضریب پیرآ 20 به دست می‌آید. به بیان Den Hartog (2013)، عدد اشتروهل به عدد رینولدز بستگی دارد، اما مقدار آن 0.22 معمولاً در اکثر مسائل استفاده می‌شود. در این پژوهش، بسته به عدد رینولدز، عدد اشتروهل از 0.17 تا 0.19 متغیر بوده بنابراین F متقابلاً از $1/7$ تا $1/9$ متغیر است.

میدان جریان با ادغام عددی معادلات دو بعدی ناویه-استوکس 21 ($N-S$)، بدون نیروهای خارجی، که شامل معادلات پیوستگی (معادله ۵) و مومنتوم (معادله ۶) در یک سیستم مختصات دکارتی است، به دست می‌آید. مبدأ مختصات دکارتی در پایین سمت چپ کانال قرار دارد. این معادلات در یک سیال نیوتنی برای جریان ویسکوزی تراکم‌ناپذیر غیردایمی، به شرح زیر است:

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (6)$$

که در آن u بردار سرعت، t زمان، ν ویسکوزیته سینماتیکی بوده و p و ρ به ترتیب فشار و چگالی جرمی سیال را نشان می‌دهند که چگالی آب برابر 1000 کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد.

در کار پژوهشی حاضر، کد دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) OpenFOAM برای حل معادلات ناویه-استوکس استفاده شد (Lysenko et al., 2012; Montelpare & Ricci, 2016). از آنجایی که این نرم‌افزار به صورت رایگان و متن‌باز می‌باشد و نیز قابلیت برنامه‌نویسی را دارد امروزه در بیش‌تر شبیه‌سازی‌های مرتبط با مکانیک سیالات از جمله انتقال حرارت و حتی پخش آلودگی مورد استفاده پژوهش‌گران بسیاری قرار می‌گیرد. دو نوع حلگر OpenFOAM به نام‌های *icoFoam* و *pimpleFoam* شامل دو نوع الگوریتم *PISO* و *PIMPLE* برای

استوانه (D) به فاصله بین دیواره‌های کانال (H) است به شرح زیر است:

$$B = \frac{D}{H} \quad (2)$$

در کانال‌هایی که سیلندرها در عرض کانال در یک ردیف مستقیم قرار دارند، D باید مجموع قطر سیلندرها در مقطع باشد. در مدل توسعه یافته، با در نظر گرفتن D و H به ترتیب برابر با یک و 20 ، نسبت انسداد برابر با 0.05 در نظر گرفته شد. از آنجایی که پهنای حوزه محاسباتی در مدل توسعه یافته به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده است، انتظار بر این است که جریان در مرزهای پایین و بالایی به شرایط جریان آزاد میل کند و مرزها تأثیر کمی بر الگوهای جریان داشته باشند (Sohankar et al., 1998; Etminan et al., 2011; Kanaris et al., 2011). از طرف دیگر، با استفاده از قطر استوانه به عنوان طول مشخصه $[m]$ ، سرعت جریان ورودی خط مرکزی، $|U|$ ، به عنوان مقیاس سرعت $[m/s]$ و ν به عنوان ویسکوزیته سینماتیکی 15 $[m^2/s]$ ، عدد رینولدز (Re) را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$Re = \frac{D|U|}{\nu} \quad (3)$$

در هر دو مدل، D و ν ثابت فرض شده و به ترتیب برابر با یک‌دهم متر و یک صدم مترمربع بر ثانیه هستند، اما در مدل دوم، $|U|$ برای به دست آوردن اعداد رینولدز مختلف متفاوت است. Norberg (2001) دریافت که جریان تا عدد رینولدز حدود 160 دوبعدی باقی می‌ماند و بیش‌تر شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش کم‌تر از آن محدوده بودند. از این رو، تمام مدل‌های این پژوهش در حالت دوبعدی اجرا شد. پارامتر بی‌بعد دیگری که مکانیسم‌های جریان نوسانی را توصیف می‌کند، عدد اشتروهل 16 (St) است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$St = \frac{FD}{U} \quad (4)$$

نتایج و بحث

نتایج مدل اولیه

در این پژوهش، سه نوع اجرای مختلف به نام‌های *ico*، *icoFoam*، *pimpleFoam* و *pimpleFoam* حلگر برای جریان آرام و آشفته برای حلگر *pimpleFoam* و نیز مدل $k-\epsilon$ در مورد جریان آشفته استفاده شد. کد *icoFoam* معادلات جریان آرام تراکم‌ناپذیر ناویه استوکس را با استفاده از الگوریتم *PISO* (فشار ضمنی با تقسیم عملگرها^{۲۲}) حل می‌کند (Issa, 1985). الگوریتم *PISO* می‌تواند غیرمعامد بودن مش را با تکرارهای متوالی غیرمعامد در نظر بگیرد و ذاتاً به صورت گذرا بوده و به یک شرط اولیه و شرایط مرزی نیاز دارد. کد *pimpleFoam* از الگوریتم *PIMPLE* استفاده می‌کند که ترکیبی از الگوریتم *PISO* با الگوریتم *SIMPLE* (روش نیمه‌ضمنی برای معادلات مرتبط با فشار^{۲۳}) است که برای شرایط حالت جریان دایمی استفاده می‌شود (Patankar, 1980). این الگوریتم‌ها دارای روش‌های تکرار شونده درونی برای جفت کردن معادلات برای بقای حرکت و جرم به منظور حل معادلات پیوستگی و مومنتوم هستند. آن‌ها برای گسسته‌کردن میدان جریان در مکان بر روی یک مش دکارتی مستطیلی با روش حجم محدود^{۲۴} (*FVM*) و یکپارچه در زمان، با استفاده از روش ضمنی مرتبه دوم استفاده می‌شوند. برای همه متغیرها اگر تمام باقیمانده‌های مقیاس شده در سطح پایین‌تر و زیر $0/001$ باشند، فرایند تکرار متوقف می‌شود. گام زمانی بی‌بعد در تمامی شبیه‌سازی‌ها یک صدم تنظیم شد. بیش از ۲۰۰ شبیه‌سازی برای پوشش پارامترهای مورد نیاز اجرا شد. محاسبات بر روی سیستم Intel(R) Core(TM) i5-4200U با پردازنده ۲/۶ گیگاهرتزی و رم ۴ گیگابایتی به صورت موازی (با استفاده از چهار هسته)، به منظور کاهش زمان محاسبات انجام شد. هم‌چنین، محاسبات پس از ۲۰۰،۰۰۰ تکرار به محض دستیابی به پایداری خاتمه یافته و زمان CPU برای هر مورد تقریباً ۲۵ ساعت است.

در این پژوهش، سه نوع اجرای مختلف به نام‌های *ico*، *icoFoam*، *pimpleFoam* و *pimpleFoam* حلگر برای جریان آرام و آشفته برای حلگر *pimpleFoam* و نیز مدل $k-\epsilon$ در مورد جریان آشفته استفاده شد. کد *icoFoam* معادلات جریان آرام تراکم‌ناپذیر ناویه استوکس را با استفاده از الگوریتم *PISO* (فشار ضمنی با تقسیم عملگرها^{۲۲}) حل می‌کند (Issa, 1985). الگوریتم *PISO* می‌تواند غیرمعامد بودن مش را با تکرارهای متوالی غیرمعامد در نظر بگیرد و ذاتاً به صورت گذرا بوده و به یک شرط اولیه و شرایط مرزی نیاز دارد. کد *pimpleFoam* از الگوریتم *PIMPLE* استفاده می‌کند که ترکیبی از الگوریتم *PISO* با الگوریتم *SIMPLE* (روش نیمه‌ضمنی برای معادلات مرتبط با فشار^{۲۳}) است که برای شرایط حالت جریان دایمی استفاده می‌شود (Patankar, 1980). این الگوریتم‌ها دارای روش‌های تکرار شونده درونی برای جفت کردن معادلات برای بقای حرکت و جرم به منظور حل معادلات پیوستگی و مومنتوم هستند. آن‌ها برای گسسته‌کردن میدان جریان در مکان بر روی یک مش دکارتی مستطیلی با روش حجم محدود^{۲۴} (*FVM*) و یکپارچه در زمان، با استفاده از روش ضمنی مرتبه دوم استفاده می‌شوند. برای همه متغیرها اگر تمام باقیمانده‌های مقیاس شده در سطح پایین‌تر و زیر $0/001$ باشند، فرایند تکرار متوقف می‌شود. گام زمانی بی‌بعد در تمامی شبیه‌سازی‌ها یک صدم تنظیم شد. بیش از ۲۰۰ شبیه‌سازی برای پوشش پارامترهای مورد نیاز اجرا شد. محاسبات بر روی سیستم Intel(R) Core(TM) i5-4200U با پردازنده ۲/۶ گیگاهرتزی و رم ۴ گیگابایتی به صورت موازی (با استفاده از چهار هسته)، به منظور کاهش زمان محاسبات انجام شد. هم‌چنین، محاسبات پس از ۲۰۰،۰۰۰ تکرار به محض دستیابی به پایداری خاتمه یافته و زمان CPU برای هر مورد تقریباً ۲۵ ساعت است.

شکل (۳) پروفیل‌های مؤلفه‌های U و V سرعت را در امتداد خط مرکزی برای مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی نشان می‌دهد. شکل (۳-ا) سرعت جریان را از فاصله ۰/۹۵ متری از سمت چپ استوانه مربعی شکل (رو به بالادست جریان) تا ۱/۹۵ متری پایین‌تر از آن (پایین‌دست جریان) را نشان می‌دهد (توجه شود که ضلع استوانه ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد). زمانی که شکل (۳) نشان می‌دهد لحظه‌ای است که در آن سرعت عرضی V در فاصله ۱/۰۵ متری پشت استوانه قرار داشته و علامت آن از منفی به مثبت تغییر می‌یابد. مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی در مجاورت سیلندر نسبت به جاهای دیگر دقت بیشتری دارد و در دیگر قسمت‌ها مقادیر شبیه‌سازی را بیش‌تر از

محوری مختلف در صفر $x=0$ ، چهار و هشت نشان می‌دهد. نتایج برای هر دو حالت شبیه‌سازی شده و واقعی به ترتیب با رنگ معرف قرمز و آبی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که هم‌خوانی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر واقعی در مجاورت استوانه برای حالت صفر $x=0$ عالی است. اما در پروفیل‌های دور از استوانه انحرافات کوچکی بین دو مجموعه نتایج دیده می‌شود؛ به هر حال در هر دو جهت، بهترین نتایج برای حالت صفر $x=0$ به دست آمده است.

مقادیر واقعی برآورد کرده است. شکل (b-3) توزیع سرعت در جهت عرضی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پروفیل شبیه‌سازی شده مقدار سرعت بعد از استوانه را تا 0.95 متر، کمی بیشتر محاسبه نموده، اما بعد از آن فاصله سرعت را مقداری کمتر از مقادیر واقعی در نظر گرفته است. اما در مجموع، نتایج مطابقت بسیار خوبی با مقادیر واقعی دارد.

شکل (4) پروفیل‌های سرعت در جهت طولی (شکل a-4) و عرضی (شکل b-4) را در سه موقعیت

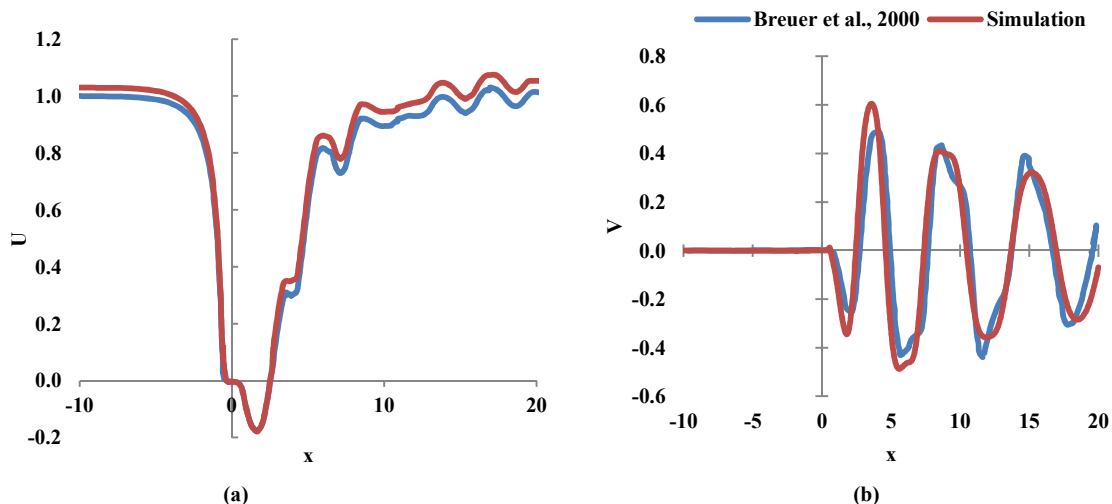


Figure 3. a) streamwise (U), and b) cross-sectional velocity (V) profiles at $Y=0$

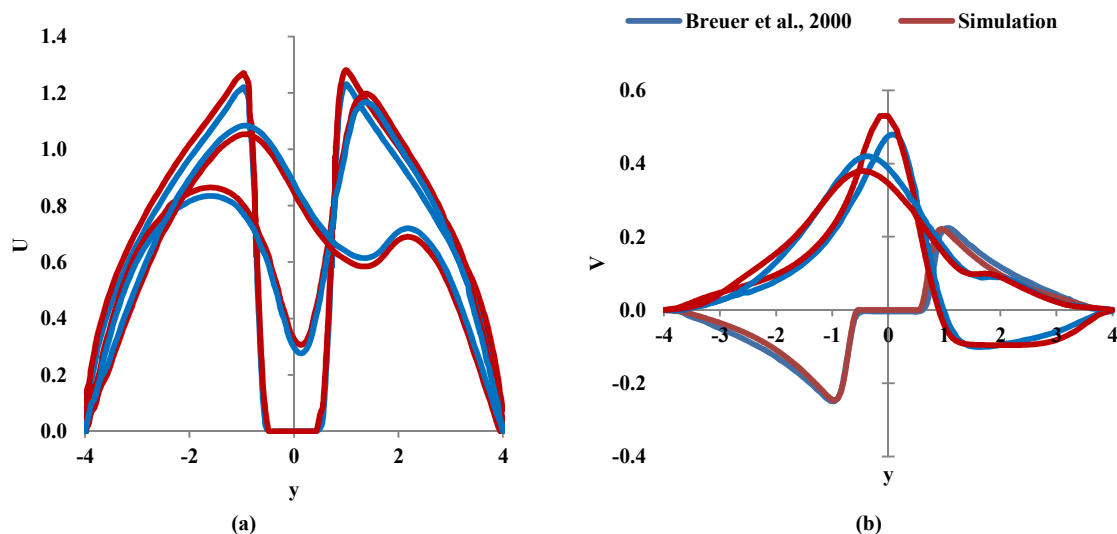


Figure 4. a) streamwise (U), and b) cross-sectional velocity (V) profiles at $x=0, 4$ and 8

افزایش سرعت، میدان جریان را به ترتیب در حالت دائمی یا غیردائمی قرار می‌دهد. Anjum & Tanaka (2019) نیز در پژوهش خود یک جریان غیریکنواخت در داخل قسمت‌های با پوشش‌های گیاهی دولایه و ناپیوسته مشاهده کردند. هم‌چنان که Diwivedi et al. (2022) در مطالعه نسبت فاصله ۲/۵ تا ۵/۵ افزایش بی‌سابقه‌ای برای پارامترهای جریان در فاصله بحرانی برای استوانه پایین دست نسبت به استوانه بالادست مشاهده کردند. در این مورد نتایج Wang et al. (2022) هم نشان داد که گرداب بین دو سیلندر عامل کلیدی مؤثر بر مقاومت فشاری سیلندرها در موج داخلی محیط فرورفته است. حالت انتقالی ذکر شده برای مورد اول در سرعت برابر با ۰/۰۹ متر بر ثانیه (رینولدز برابر با نه) رخ داد، در حالی که در مورد دوم در در سرعت برابر با ۰/۳۵ متر بر ثانیه (رینولدز برابر با ۳۵) اتفاق افتاد. در مجموع، نتایج نشان داد که با افزایش ۵۵ درصدی نسبت فاصله بین استوانه‌ها، مقدار سرعت بحرانی (سرعتی که در آن میدان جریان از حالت دائمی به حالت غیردائمی تغییر می‌یابد) ۷۴ درصد کاهش می‌یابد. در واقع، ناپایداری در میدان جریان در حالتی که فضای بین سیلندرها افزایش می‌یابد، زودتر (یعنی در سرعت کم‌تر) رخ می‌دهد و این نتایج با نتایج Sarwar Abbasi et al. (2018) و Wang et al. (2021) مطابقت بسیار خوبی دارد.

در ادامه، یک مساحت مستطیل شکل در میان استوانه‌های دوطبقه، که فقط فضای بین آن‌ها را پوشش می‌دهد (به نام "حالت مساحت") بررسی شده و حداکثر خطوط زمانی سرعت^{۲۸} طولی در زمان ۲۰۰ ثانیه در این ناحیه محاسبه شد. لازم به یادآوری است که با داشتن دو سرعت ورودی یک متر بر ثانیه و نیم متر بر ثانیه دو نوع عدد رینولدز به ترتیب با مقدار ۱۰۰ و ۵۰ در نظر گرفته شد. با داشتن دو Re و دو G

جدول (۱) نتایج PE برای هر سه حلگر pim_la ، ico و pim_tu در محاسبه توزیع هر دو مؤلفه سرعت در چهار بخش مختلف را نشان می‌دهد.

Table 1. Results of percent error for both directions at different sections for ico , pim_la and pim_tu , respectively

Section Direction	$y = 0$	$x = 0$	$x = 4$	$x = 8$
U	8, 12, 13	7, 13, 11	6, 15, 16	8, 13, 14
V	5, 14, 14	1, 10, 8	7, 14, 14	9, 14, 15

با مقایسه سه حلگر می‌توان نتیجه گرفت که ico با میانگین PE برابر شش درصد عملکرد بهتری نسبت به pim_la با میانگین PE برابر با ۱۳ درصد و pim_tu با میانگین PE برابر با ۱۳ درصد در محاسبه مقدار سرعت دارد. بنابراین، حلگر $icoFoam$ برای استفاده در هندسه توسعه یافته دوم انتخاب شد.

نتایج دومین مدل

همان‌طور که در بخش دوم توضیح داده شد، با توجه به فاصله بین استوانه‌ها، دو مورد در مدل توسعه یافته بررسی شد؛ حالت اول با $G=5D$ و حالت دوم با $G=2.5D$ در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی‌ها از سرعت کم، جایی که جریان در کانال در حالت دائمی بود، شروع شده و در هر دو حالت به تدریج به سرعت‌های بالاتر افزایش یافت. از آنجایی که مقادیر D و ν ثابت هستند، در نتیجه با افزایش سرعت مقدار عدد رینولدز نیز افزایش می‌یابد. مشاهده شد که پس از اجرای گام‌های زمانی، نوعی تغییر (نوعی اختلال) در حالت جریان در اندازه مشخصی از سرعت جریان، رخ می‌دهد. این اختلال نوعی تغییر سینوسی یا نوسان سرعت بود که از پایین دست شروع شده و به سمت بالادست کانال منتقل می‌شود. می‌توان گفت که در این مقدار مشخص از سرعت جریان (سرعت بحرانی)، جریان در حالت انتقالی قرار می‌گیرد و هر کاهش یا

ابتدا کاهش یافته سپس برای مدتی نزدیک مقادیر صفر باقی‌مانده و پس از آن دوباره افزایش یافته و نوسان می‌کنند. حداکثر سرعت مربوط به حالت اول است و فقط حدود یک چهارم مواقع در مجاورت سرعت‌های صفر بوده است. در مقابل، مورد چهارم، ۹۰ درصد از زمان خود را نزدیک به مقدار صفر تجربه کرده است. مقایسه نتیجه مورد اول و دوم نشان داد که نوسان در سرعت جریان، در نسبت فاصله پنج در مقایسه با نسبت فاصله ۲/۵ زودتر رخ می‌دهد و این امر به‌خوبی با نتایج ذکرشده مطابقت دارد.

می‌توان چهار حالت ممکن را فرض کرد که به این صورت نام گرفتند؛ حالت اول که در آن Re برابر ۱۰۰ و G برابر با پنج است؛ حالت دوم، Re برابر ۱۰۰ و G برابر با ۲/۵؛ حالت سوم با Re برابر ۵۰ و G برابر با پنج و سرانجام حالت چهارم با Re برابر ۵۰ و G برابر با ۲/۵ در نظر گرفته شد. حداکثر خطوط زمانی سرعت طولی و عرضی در دوره ۲۰۰ ثانیه برای هر چهار مورد ترسیم شده و به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود در چهار حالت، حداکثر سرعت‌ها در جهت خط جریان،

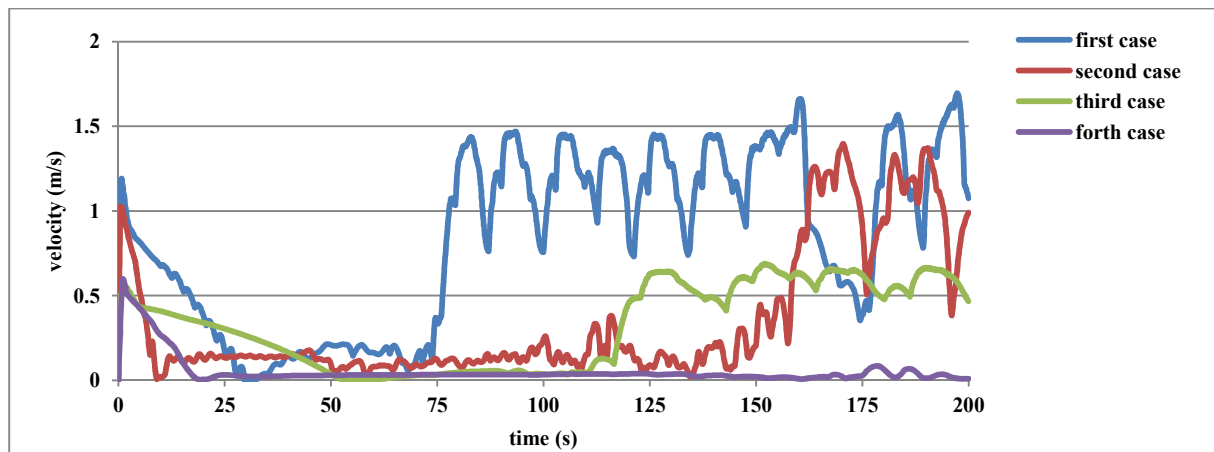


Figure 5. Timelines of velocity profiles in longitudinal direction at four cases while considering the area between two tandem cylinders

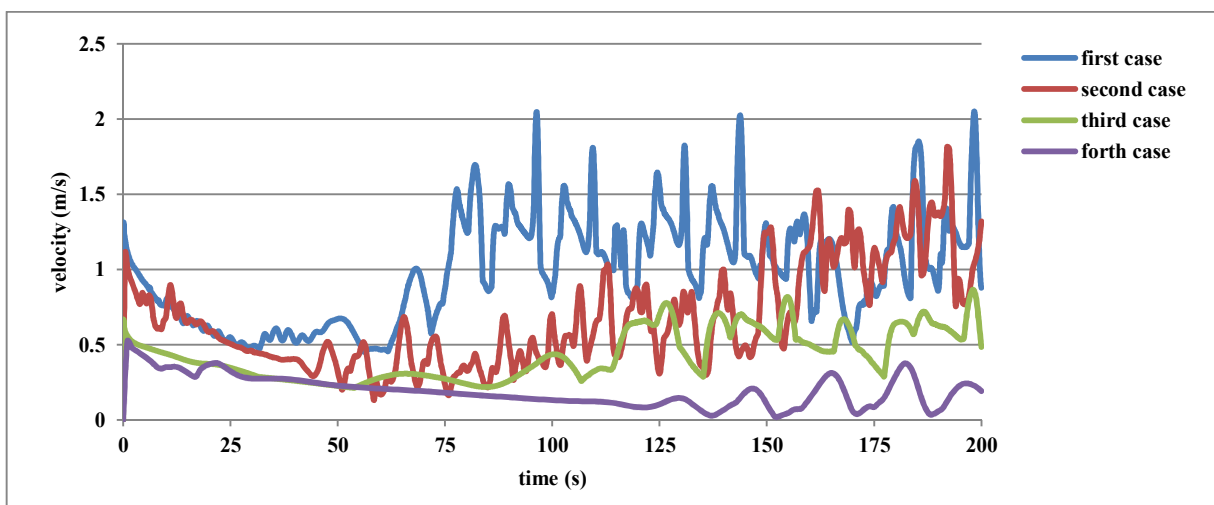


Figure 6. Timelines of velocity profiles in lateral direction at four cases while considering the area between two tandem cylinders

در مجموع بررسی شکل‌های (۵) و (۶) بیان می‌کند که کاهش نسبت فاصله باعث کاهش مقادیر سرعت در هر دو جهت شده است، اما این رویداد در حالت چهارم آشکارتر بوده و در هیچ بازه زمانی اولین سرعت ورودی خود را تجربه نکرده است.

در ادامه برای بررسی دقیق مسئله، صفحه‌ای که تمام سطح مقطع کانال را پوشانده و درست در وسط دو استوانه قرار دارد در نظر گرفته شد ("حالت مقطع"). حداکثر خطوط زمانی سرعت طولی و عرضی در مدت ۲۰۰ ثانیه‌ای برای چهار حالت ترسیم و به ترتیب در شکل‌های (۷-a) و (۷-b) نشان داده شد. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت فاصله دو استوانه، نوسانات سرعت در جهت طولی و جانبی برای هر دو عدد رینولدز افزایش یافته است.

شکل (۶) نتایج سرعت عرضی را در چهار مورد نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقادیر سرعت عرضی برای حالت با فاصله زیاد بین سیلندرها تقریباً بیشتر از حالت دیگر است در حالی که سرعت‌های ورودی یکسانی دارند و این تفاوت برای نسبت فاصله ۲/۵ آشکارتر است. در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شد که به جز حالت چهارم، مقادیر سرعت‌های طولی و جانبی نسبت به مقدار سرعت ورودی، سرعت بیشتری را تجربه کرده‌اند. در واقع، حالت چهارم نشان می‌دهد که داشتن دو مشخصه شامل سرعت ورودی کوچک (عدد رینولدز کم) و هم‌چنین نسبت فاصله کوچک باعث می‌شود که تغییرات سرعت در هر دو جهت بسیار کوچک‌تر از مقادیر اولیه آن‌ها باشند.

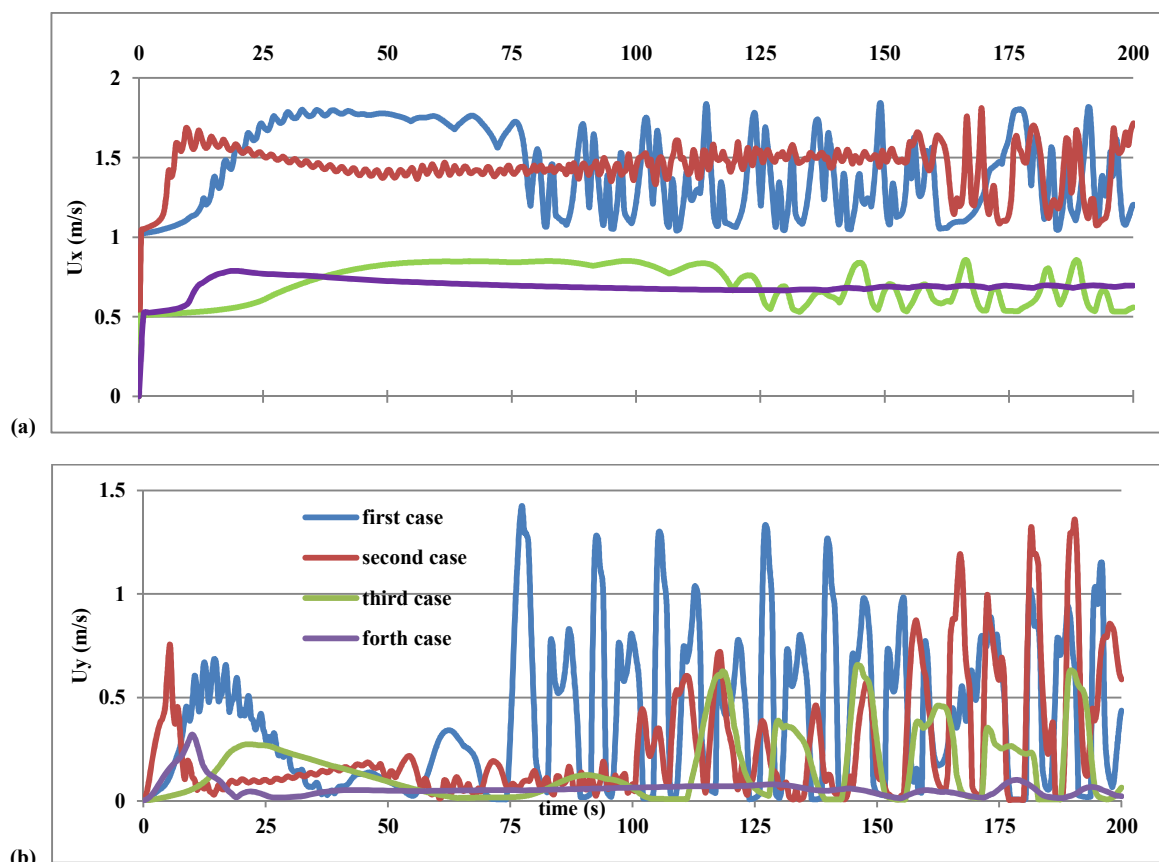


Figure 7. Timelines of velocity profiles at longitudinal a) and, lateral b) directions at four cases while considering a section in the middle of two cylinders

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، برای بررسی ویژگی‌های جریان در یک کانال با پوشش گیاهی، شبیه‌سازی موفقی برای دو هندسه ساده شامل یک و دو استوانه با مقطع مربعی شکل انجام شد. به‌منظور درک تأثیر نسبت فاصله (G)، دو نوع فاصله نسبی، ۲/۵ و پنج مورد مطالعه قرار گرفت. این شبیه‌سازی عددی، الگوهای پیچیده جریان و توزیع سرعت مرتبط با یک هندسه خاص از یک کانال مستطیلی در مجاورت دو بلوک مکعبی شکل ثابت را بازتولید کرد. ابتدا در حالت تک‌استوانه‌ای، دو نوع حلگر *OpenFoam* شامل *icoFoam* (با الگوریتم PISO) و *pimpleFoam* (با الگوریتم PIMPLE)، برای مطالعه عددی دوبعدی استفاده شد. حلگر *icoFoam* با شبیه‌سازی جریان آرام و حلگر *pimpleFoam* با هر دو شبیه‌سازی جریان آرام و آشفته اجرا شدند. نتایج حاصله از دو حلگر در محاسبه مقدار سرعت‌های طولی و جانبی در سه مقطع خط جریان (صفر= x ، چهار و هشت) و یک مقطع جریان (صفر= y) با داده‌های موجود در کار *Beurer et al.* (2000) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نشان داد که حلگر *icoFoam* با درصد خطای (PE) شش درصد عملکرد بهتری نسبت به حلگر *pimpleFoam* با درصد خطای ۱۳ درصد دارد؛ لذا برای مدل‌سازی‌های بعدی با دو استوانه انتخاب شد.

مدل جدید با دو استوانه مربعی دوپشته با نسبت فاصله ۲/۵ و پنج تولید شد. الگوی جریان، توزیع سرعت و ویژگی‌های فشار در کانال در سرعت‌های ورودی مختلف برای این دو مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش اندازه سرعت ورودی، نوعی تغییر سینوسی در پروفیل سرعت کانال که از پایین‌دست شروع شده و به سمت بالادست کانال حرکت می‌کند، در تمامی شبیه‌سازی‌ها شکل می‌گیرد. این اختلال در میدان جریان در یک سرعت بحرانی ظاهر شد که در آن جریان از حالت دائمی به حالت

مقادیر حداکثر و حداقل سرعت در جهت طولی (U_x) و جهت عرضی (U_y) و حداکثر و حداقل فشار (P) برای هر دو حالت خطوط زمانی شامل "حالت مساحت" و "حالت مقطع" بین استوانه‌ها که از محاسبه مدت زمانی ۲۰۰ ثانیه‌ای برای عدد رینولدز برابر ۱۰۰ به‌دست آمده‌اند، در جدول (۲) نشان داده شده است. مقدار منفی مؤلفه U_x ، جریان رو به عقب ناشی از مناطق برخاستگی را نشان می‌دهد و مقدار منفی مؤلفه U_y سرعت جریان را در جهت چپ به راست مقطع کانال (عمود بر خط جریان) نشان می‌دهد.

Table 2. Maximum and minimum amounts of pressure, velocity in X and Y directions at the Re of 100 in both states (section and area)

Section	U_x	U_y	P
Max	1.842	1.425	0.609
Min	-1.715	-1.516	-1.782
Area	U_x	U_y	P
Max	1.695	2.050	1.498
Min	-1.715	-1.918	-1.816

تمام نتایج حداکثر و حداقل در جدول (۲) به نسبت فاصله پنج در "حالت مساحت" تعلق دارد، اما در "حالت مقطع" حداکثر و حداقل مقدار فشار نتایج را برای نسبت فاصله ۲/۵ نشان می‌دهد. مقایسه دو حالت این جدول نشان می‌دهد که سرعت جانبی و پراکندگی فشار زیاد هنگام در نظر گرفتن ناحیه مستطیلی بین دو استوانه، رخ می‌دهد. از سوی دیگر، قرار گرفتن مقدار سرعت طولی بالا در "حالت مقطع" نشان می‌دهد که نواحی بیرونی بین دو سیلندر نسبت به نواحی داخلی سرعت‌های سریع‌تری را تجربه کرده‌اند. علاوه بر این، همان‌طور که توسط U_y نشان داده شده است، در مورد "حالت مساحت"، حداکثر سرعت در جهت جانبی حتی دو برابر (۲/۰۵ متر بر ثانیه) اندازه مقدار اولیه (یک متر بر ثانیه) رسیده است.

در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که پوشش گیاهی تأثیر مهمی بر ویژگی‌های جریان در ترتیب دوپشته دارد و شدت آن با افزایش نسبت فاصله کاهش می‌یابد. هم‌چنین با کاهش سرعت ورودی و کاهش نسبت فاصله سیلندرها، می‌توان سرعت‌های کم‌تری را در هر دو جهت طولی و جانبی به‌دست آورد، هم‌چنین اجرای هر دوی این محدودیت‌ها بیش‌ترین تأثیر را در کاهش مقادیر سرعت دارد.

پی‌نوشت‌ها

1. Computational Fluid Dynamics
2. Drag coefficient
3. Blockage ratio
4. Reynolds number
5. Wake
6. Lattice Boltzmann Method
7. Overlay effect
8. Tandem
9. Viscous flow
10. Dirichlet Boundary Condition
11. Law of wall
12. Overtake
13. Courant-Friedrichs-Lewy
14. Courant number
15. Kinematic viscosity
16. Strouhal number
17. Vortex shedding frequency
18. Fast Fourier Transform
19. Time history
20. Lift coefficient
21. Navier-Stokes
22. Pressure Implicit with Splitting of Operators
23. Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
24. Finite Volume Method
25. Streamline direction
26. Cross-sectional direction
27. Percentage Error
28. Velocity timelines

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Adeeb, E., Haider, B. A., & Sohn, C. H. (2018). Flow interference of two side-by-side square cylinders using IB-LBM Effect of corner radius. *Results in Physics* 10, 256-263.

غیردایمی تغییر می‌کند. لحظات وقوع این حالت غیردایمی در فاصله بین سیلندرها ثبت شد. ملاحظه شد که برای نسبت فاصله پنج، این ناپایداری به‌طور متوسط در عدد رینولدز هشت اتفاق می‌افتد، در حالی که برای نسبت فاصله ۲/۵ در میانگین رینولدز برابر با ۳۲ رخ می‌دهد. از این‌رو، نشان داده شد که عدد رینولدز بحرانی تا حد زیادی به فاصله بین سیلندرها بستگی دارد و با افزایش ۵۵ درصدی نسبت فاصله بین استوانه‌ها، مقدار سرعت بحرانی ۷۴ درصد کاهش می‌یابد که این واقعه در نتیجه اثر هم‌پوشانی اتفاق می‌افتد و نیز نتیجه فوق با نتایج دیگر پژوهش‌گران از جمله Anjum & Diwivedi *et al.* (2020) Wu *et al.* (2019) Tanaka (2021) Wang *et al.* (2022) و Wang *et al.* (2022) هم‌خوانی خوبی دارد.

با فرض دو عدد رینولدز ۵۰ و ۱۰۰ و هم‌چنین دو نسبت فاصله ۲/۵ و پنج، چهار حالت نامگذاری شد. دو محدوده مکانی به‌عنوان بخش‌های مورد‌محاسبه در نظر گرفته شدند؛ "حالت مقطع" یعنی مقطعی واقع در وسط دو استوانه که از دیوار راست به دیوار چپ امتداد دارد؛ دیگری "حالت مساحت" که یک ناحیه مستطیل شکل که فقط فاصله بین دو استوانه پشت سر هم را پوشش می‌دهد. حداکثر خطوط زمانی سرعت طولی و عرضی در دوره تناوب ۲۰۰ ثانیه‌ای برای چهار مورد در دو محدوده مکانی محاسبه و نمایش داده شد. مقایسه نتایج برای موارد با عدد رینولدز مشابه نشان داد که نوسان در سرعت‌های در جهت جریان در نسبت فاصله پنج در مقایسه با نسبت فاصله ۲/۵ سریع‌تر رخ می‌دهد. هم‌چنین، نتایج نشان داد که کاهش نسبت فاصله باعث کاهش در اندازه سرعت در هر دو جهت طولی و جانبی شده است. تأیید شد که با افزایش نسبت فاصله دو استوانه، نوسانات سرعت در جهت طولی و جانبی برای هر دو شکل رینولدز افزایش یافته است.

2. Ali, K. H., & Karim, O. (2002). Simulation of flow around piers. *J. Hydraul. Res.*, 40, 161-174.
3. Anjum, N., & Tanaka, N. (2019). Study on the flow structure around discontinued vertically layered vegetation in an open channel. *J. of Hydrodynamics*.
<https://doi.org/10.1007/s42241-019-0040-2>
4. Bai, H., & Li, J. W. (2011). Numerical Simulation of Flow Over a Circular Cylinder at Low Reynolds Number. *Advanced Material Res*, 255-260: 942.
5. Breuer, M., Bernsdorf, J., Zeiser, T., & Durst, F. (2000). Accurate computations of the laminar flow past a square cylinder based on two different methods: lattice-Boltzmann and finite-volume. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21, 186-196.
6. Butt, U., & Egbers, C. (2013). Aerodynamic Characteristics of Flow Over Circular Cylinders with Patterned Surface. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 1(2), 121.
7. Cao, S., & Tamura, Y. (2008). Flow Around a Circular Cylinder in Linear Shear Flows at Subcritical Reynolds Number. *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96,10-11: 1961.
8. Cao, Y., Tamura, T., & Kawai, H. (2020). Spanwise resolution requirements for the simulation of high-Reynolds-number flows past a square cylinder. *Computers and Fluids*, 196, 104320.
<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2019.104320>
9. Curran, J. C., & Hession, W. C. (2013). Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system, *J. of Hydrology*, 505, 364-376.
10. Den Hartog, J. P. (2013). *Mechanical Vibrations*. Dover Publications. ISBN: 0486131858.
11. Diwivedi, A. R., Dhiman, A., & Sanyal, A. (2022). Stratified Shear-Thinning Fluid Flow Past Tandem Cylinders in the Presence of Mixed Convection Heat Transfer With a Channel-Confining Configuration. *J. Fluids Eng.*, 144(5), 051301. <https://doi.org/10.1115/1.4052473>
12. Dupuis, V., Proust, S., Berni, C., & Paquier, A. (2016). Combined effects of bed friction and emergent cylinder drag in open channel flow. *Environmental Fluid Mechanics*. doi: 10.1007/s10652-016-9471-2
13. Durao, D. F. G., Gouveia, P. S. T., & Pereira, J. C. F. (1991). Velocity characteristics of the flow around a square cross section cylinder placed near a channel wall. *Experiments in Fluids*, 11, 341-350.
14. Etminan, A., Moosavi, M., & Ghaedsharifi (2011). Determination of flow configuration and fluid forces acting on two tandem square cylinders in cross-flow and its wake patterns. *International Journal of Mechanics*, 5(2).
15. Gamet, L., Scala, M., Roenby, J., Scheufler, H., & Pierson, J. L. (2020). Validation of volume-of-fluid OpenFOAM® isoAdvector solvers using single bubble benchmarks. *Computers & Fluids*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2020.104722>
16. Gao, Y., Chen, W., Wang, B., & Wang, L. (2019). Numerical simulation of the flow past six-circular cylinders in rectangular configurations. *Journal of Marine Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00773-019-00676-7>
17. Gera, B., Sharma, P. K., & Singh, R. K. (2010). CFD Analysis of 2D Unsteady Flow Around a Square Cylinder. *International J. of Applied Engineering Research*, 1(3), 602.
18. Ghisalberti, M., & Nepf, H. M. (2002). Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows, *J. Geophys. Res.*, 107 (C2) 1-11.
19. Greenshields, C. J. (2019). *OpenFOAM User Guide version 7*, OpenFOAM Foundation Ltd, CFD Direct Ltd. <https://openfoam.org>
20. Haddadi, B., Jordan, C., & Harasek, M. (2018). *OpenFOAM® Basic Training, 4th edition*. Institute of Chemical, Environmental & Bioscience Engineering, Technische Universität Wien.
21. Issa, R. I. (1985). Solution of the implicitly discretized fluid flow equations by operator-splitting. *J. Comput Phys*, 62, 40-65.
22. Kanaris, N., Grigoriadis, D., & Kassinos, S. (2011). Three dimensional flow around a circular cylinder confined in a plane channel. *Physics of fluids*, 23, 064106. doi:10.1063/1.3599703
23. Kang, H. (2013). Flow Characteristics and Morphological Changes in Open-Channel Flows with Alternate Vegetation Zones. *KSCE J. of Civil Engineering*, 17(5), 1157-1165.
24. Kharlamov, A. A. (2012). Modeling of transverse self-oscillations of a circular cylinder in an incompressible fluid flow in a plane channel with circulation. *J. of Applied Mechanics and Technical Physics*, 53(1), 38-42.
25. Kozlov, I. M., Dobergo, K. V., & Gnesdilov, N. (2011). Application of RES Methods for Computation of Hydrodynamic Flows by an Example of 2D Flow Past a Circular Cylinder for Re = 5–200. *International J. of Heat and Mass Transfer*, 54(4), 887. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer>

26. Kumar, A., & Ray, R. K. (2018). Numerical Simulation of Flow Around Square Cylinder with an Inlet Shear in a Closed Channel. *Applications of Fluid Dynamics*, Proceedings ICAFD 2016, 297-304. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5329-0_21
27. Lam, K., Li, J. Y., Chan, K. T., & So, R. M. C. (2003). Flow pattern and velocity field distribution of cross-flow around four cylinders in a square configuration at a low Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 17, 665-679.
28. Lopez, F., & Garcia, M. (2001). Mean flow and turbulence structure of open channel flow through non-emergent vegetation, *ASCE J. Hydraul. Eng.*, 127 (5), 392-402.
29. Lysenko, D. A., Ertesvag, I. S., & Rian, K. E. (2012). Large-eddy simulation of the flow over a circular cylinder at Reynolds number 3900 using the OpenFOAM toolbox. *Flow Turbulence Combust*, 89(4), 491-518.
30. Montelpare, D. V. S., & Ricci, R. (2016). Detached-eddy simulations of the flow over a cylinder at Re = 3900 using OpenFOAM. *Comput Fluids*, 136(10), 152-169.
31. Nakagawa, S., Nitta, K., & Senda, M. (1999). An experimental study on unsteady turbulent near wake of a rectangular cylinder in channel flow. *Experiments in Fluids*, 27, 284-294.
32. Norberg, C. (2001). Flow around a circular cylinder: Aspects of fluctuating lift. *J. Fluids Struct*, 15 (3-4): 459-69.
33. Ong, M. C., Utnes, T., Holmedal, L. E., Myrhaug, D., & Pettersen, B. (2009). Numerical Simulation of Flow Around a Smooth Circular Cylinder at Very High Reynolds Numbers. *Marine Structures*, 22, 142. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc>
34. Park, J., Kwon, K., & Choi, H. (1998). Numerical solutions of flow past a circular cylinder at Reynolds numbers up to 160. *KSME International J.*, 12(6), 1200-1205.
35. Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corp., Fluid dynamics, Taylor & Francis, ISBN: 978-0-89116-522-4.
36. Perumal, D. A., Kumar, G. V. S., & Dass, A. K. (2012). Numerical Simulation of Viscous Flow over a Square Cylinder Using Lattice Boltzmann Method. *International Scholarly Research Network ISRN Mathematical Physics*, Vol. 2012, Article ID 630801, doi:10.5402/2012/630801
37. Rajani, B. N., Gowda, R. V. P., & Ranjan, P. (2013). Numerical Simulation of Flow past a Circular Cylinder with Varying Tunnel Height to Cylinder Diameter at Re 40. *International J. of Computational Engineering Research (ijceronline.com)*, 3(1), 188-194.
38. Rajani, B. N., Kandasamy, A., & Majumdar, S. (2009). Numerical Simulation of Laminar Flow Past a Circular Cylinder. *Applied Mathematics Modeling*, 33(3), 1228-1247.
39. Reichi, P., Hourigan, K., & Thompson, M. C. (2005). Flow past a cylinder close to a free surface. *J. Fluid Mech.*, 533, 269-296.
40. Richardson, E. V., & Panchang, G. V. (1998). Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers. *J. Hydraul. Eng.*, 124(5), 530-540.
41. Samet, K., Hoseini, K., Karami, H., & Mohammadi, M. (2019). Comparison Between Soft Computing Methods for Prediction of Sediment Load in Rivers: Maku Dam Case Study. *Iran. J. Sci. Technol., Trans. Civ. Eng.*, 43, 93-103.
42. Sarwar Abbasi, W., Islam, S. U., Faiz, L., & Rahman, H. (2018). Numerical investigation of transitions in flow states and variation in aerodynamic forces for flow around square cylinders arranged inline. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(11), 2111-2123.
43. Sohankar, A., Norberg, C., & Davidson, L. (1998). Low-Reynolds-number flow around a square cylinder at incidence: study of blockage, onset of vortex shedding and outlet boundary condition. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 26, 39-56.
44. Sumer, B. M., & Fredsøe, J. (1997). Hydrodynamics Around Cylindrical Structures. *Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 12*. World Scientific, Singapore.
45. Vojoudi Mehrabani, F., Mohammadi, M., Ayyoubzadeh, S. A., Fernandes, João N., & Ferreira, Rui M. L. (2020a). Turbulent Flow Structure in a Vegetated Non-Prismatic Compound Channel, *Proceedings, Journal of River Research and Applications, Wiley*, 36, 1868-1878.
46. Vojoudi Mehrabani, F., Mohammadi, M., & Ayyoubzadeh, S. A. (2020b). Flow Behavior in Non-Prismatic Convergent Compound Channel with Submerged Vegetation on Floodplains, *Proceedings, Iranian Journal of Hydraulics, IHA*, 15(1). (In Persian)
47. Wang, D., Liu, Y., Li, H., & Xu, H. (2021). Secondary instability of channel-confined transition around dual-circular cylinders in tandem. *International Journal of Mechanical Sciences* 208, 106692, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106692>

48. Wang, Y., Wang, L., J, Y., Zhang, J., Xu, M., Xiong, X., & Wang, C. (2022). Research on the force mechanism of two tandem cylinders in a stratified strong shear environment. *Phys. Fluids*, 34, 053308. doi:10.1063/5.0089408
49. Wu, Y. J., Jing, H. F., Li, C. G., & Song, Y. T. (2020). Flow characteristics in open channels with aquatic rigid vegetation. *Journal of Hydrodynamics*, 32(6), 1100-1108.
50. Zhang, C. W. L., & Y. M. Shen, (2010). A 3D non-linear $k-\epsilon$ turbulent model for prediction of flow and mass transport in channel with vegetation, *App. Math. Modell*, 34, 1021-1031.