

بررسی عددی پارامترهای هیدرولیکی جریان عبوری از فلوم‌های SMBF چندگانه

شیوا کیانی^{۱*}، طاهر رجائی^۲ و محمد کرم دخت بهبهانی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲۹)

چکیده

در این پژوهش به بررسی پارامترهای هیدرولیکی جریان بر روی فلوم‌های smbff در دو حالت ساده و چندگانه پرداخته شده است. در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی عددی فلوم smbff از نرم افزار Flow3D استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها در سه دبی (۵، ۱۵ و ۳۰) لیتر بر ثانیه و سه میزان بازشدگی (۰/۷۵، ۰/۱ و ۰/۱۵) متر انجام شده است. نتایج نشان داد که در زمان استفاده از فلوم‌های smbff چندگانه به جای فلوم‌های smbff ساده حداکثر به طور میانگین در دبی ۵ لیتر بر ثانیه ۱۲ درصد، در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه ۱۹ درصد و در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه ۱۰ درصد افزایش یافته است. استهلاك انرژی فلوم‌های smbff چندگانه به طور میانگین در دبی ۵ لیتر بر ثانیه ۲۱ درصد، در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه ۶۶ درصد و در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه ۱۲۲ درصد در مقایسه با فلوم‌های smbff ساده کاهش یافته است. در نهایت مشاهدات نشان داد، در زمان بهره‌وری از فلوم‌های smbff چندگانه در مقایسه با فلوم‌های smbff ساده وسعت گردابه‌ها کاهش یافته و تعداد گردابه‌ها و ناحیه تلاطم جریان افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: سرعت، استهلاك انرژی، گردابه، SMBF، Flow3D

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

۳. گروه سازه‌های آبی، دانشکده علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

*مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: shivakiyani78@gmail.com

مقدمه

به منظور کنترل و اندازه گیری دبی عبوری جریان در کانال های روباز روش های متعددی جهت ارزان و ساده سازی و همچنین سهولت در ساخت و بالابردن دقت اندازه گیری توسط محققین بررسی شده است. یکی از سازه های نوین که امروز مورد توجه محققین قرار گرفته است فلوم هایی از نوع smbf است. فلوم های smbf اولین بار توسط سامانی و ماگالانز (۲۰۰۰) مورد مطالعه قرار گرفته است. فلوم smbf است. این سازه با داشتن دو نیم استوانه در طرفین کانال، باعث تنگ شدگی عرضی شده و برای اندازه گیری دبی در کانال های با جریان زیر بحرانی در بالادست استفاده می شود.

اولین مطالعات آزمایشگاهی و نظری در مورد فلوم هایی با عمق بحرانی توسط Belanger در سال ۱۸۴۹ و توسط Bazin در سال ۱۸۹۶ صورت گرفت. (هگر، ۱۹۸۶) به بررسی الگوی جریان ناشی از پایه های مخروطی شکل موجود در یک کانال مستطیلی در حالت مستغرق و تحت شرایط جریان بحرانی را مورد بررسی قرار داد. ایشان آزمایشاتی را برای رسیدن به یک معادله مناسب برای تخمین دبی عبوری جریان انجام داد. (سامانی و همکاران، ۱۹۹۱) مدل های آزمایشگاهی را برای بررسی ویژگی های هیدرولیکی چند فلوم دایره ای شکل انجام دادند. بررسی ها نشان داد که وجود ستون داخلی سطح مقطع جریان را کاهش می دهد و شرایط جریان بحرانی ایجاد می کند. (سامانی و ماگالانز، ۲۰۰۰) یک فلوم ساده و نتوری تحت عنوان فلوم های Smbf پیشنهاد دادند. آنان با فرض تشکیل عمق بحرانی در مقطع تنگ شدگی کانال و با در نظر گرفتن معادله انرژی بین بالادست و مقطع تنگ شدگی فلوم، رابطه ای را با هدف تخمین دبی عبوری جریان در شرایط جریان آزاد پیشنهاد کردند. (دی استفانو و همکاران، ۲۰۰۸) ارائه رابطه دبی - اشل یک فلوم نوین تحت عنوان فلوم های smbf که در اصل توسط (سامانی و ماگالانز، ۲۰۰۰) پیشنهاد شده و توسط بایامونته و فرو آزمایش شده است، برای اندازه گیری دبی عبوری جریان در کانال های روباز مورد بررسی قرار دادند.

(کارولو و همکاران، ۲۰۱۶) در پژوهش خود، در گام اول یک معادله دبی - اشل جدید را برای فلوم های smbf به صورت نظری ارائه کردند. در گام بعد معادله ارائه شده به طور تجربی با استفاده از اندازه گیری های آزمایشگاهی برای مقادیر مختلف نسبت انقباض اعتبارسنجی شد. در نهایت، اندازه گیری های میدانی انجام شده در منطقه آزمایشی Sparacia (سیسیل، ایتالیا جنوبی) توسط یک فلوم smbf با نسبت انقباض برابر با ۰/۵ که در یک کانال افقی قرار داده شده است، و در نهایت از داده های حاصل شده برای اعتبارسنجی رابطه دبی - اشل جدید استفاده شد. (وطن خواه و محمدی، ۲۰۲۰) فرایند مجرای عبور جریان یک فلوم ساده با دو نیم استوانه در دو طرف کانال مستطیلی تحت عنوان فلوم smbf با شیب صفر درجه را مورد بررسی قرار دادند. آنان برای گسترش دامنه داده های موجود قبلی که توسط (Baiaomonte and Ferro, 2007) صورت گرفته بود، به اجرای آزمایش های جدید با دامنه وسیع تری پرداختند. دو رابطه جدید دبی - اشل با در نظر گرفتن نسبت انقباض و با نادیده گرفتن نسبت انقباض برای محدوده مشخصی از این متغیر ارائه شد. (پارسائی و همکاران، ۲۰۲۳) ضریب سرعت جریان را در فلوم های سامانی، ماگالانز، بایامونته و فرو (SMBF) را تحت شرایط جریان آزاد و مستغرق بررسی کردند. ارزیابی ها نشان داد که شرایط جریان مستغرق باعث کاهش ضریب دبی جریان می شود. (سومه، ۲۰۲۴) در تحقیق خود اثر انقباض ناگهانی غیرمستمر بر اتلاف انرژی جریان های فوق بحرانی به صورت عددی را مورد بررسی قرار دادند. بررسی ها نشان داد که با افزایش عدد فرود جریان بالادست، اتلاف انرژی در بالادست ($\Delta E/E0$) و پایین دست ($\Delta E/E1$) افزایش می یابد. (امین پور و همکاران، ۱۳۹۷) به تحلیل آبگذری فلوم های نوع smbf در شرایط جریان آزاد و مستغرق پرداختند. بر اساس داده های آزمایشگاهی به دست آمده، عمق بالادست سازه، و میزان تنگ شدگی عرضی فلوم، معادلات دبی عبوری پیشنهادی مختلف، مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند. سپس با در نظر گرفتن ضرایب تصحیح جریان عبوری در مقطع

مواد و روش

مشخصات مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌های صورت گرفته بر روی یک کانال مستطیلی باز به طول ۱۲ متر، عرض ۰/۲۵ و ارتفاع ۰/۵ متر، دارای شیب بستر کانال مستطیلی افقی در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران واحد کرج انجام شد. (شکل ۱-الف) جزئیات فلوم آزمایشگاهی مورد نظر در جدول ۱ آورده شده است. آزمایشات انجام شده با استفاده از دبی‌های جریان در محدوده ۱/۴۴ تا ۶۷/۹ لیتر در ثانیه صورت گرفت. مقادیر دبی عبوری با استفاده از سرریزهای مثلثی (دبی کم) و مستطیلی (دبی زیاد) اندازه‌گیری شد. همچنین در این پژوهش، چهار مقدار عرض دهانه فلوم (0.075, 0.1, 0.15, 0.221) B_c متر مورد بررسی قرار گرفت.

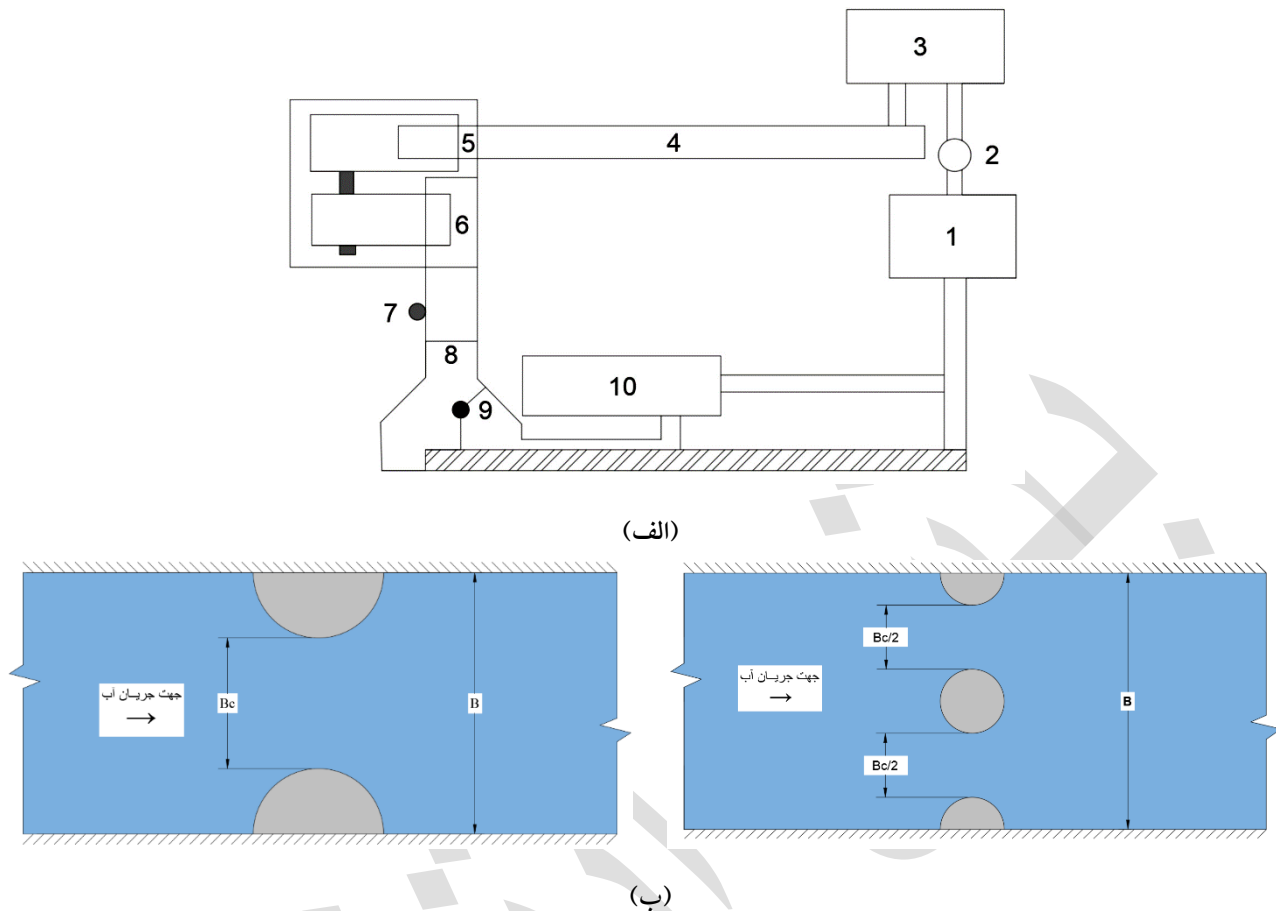
شکل (۱-الف) نمای کلی فلوم آزمایشگاهی مورد بررسی در این پژوهش را نشان می‌دهد. شکل‌های (۱-ب) نمای کلی فلوم smbf را در دو حالت ساده و چندگانه نشان می‌دهد. باتوجه به شکل (۱-ب) فلوم smbf از نوع سازه از دونیم استوانه متصل شده به جداره‌های کانال تشکیل می‌شود. عرض دهانه بین این دونیم استوانه B_c بوده و عرض کانال B است. در فلوم smbf از نوع چندگانه، سازه از چهار نیم استوانه تشکیل شده که در آن دونیم استوانه به جداره‌ها متصل شده و دونیم استوانه به صورت قرینه در مرکز کانال نصب شده است. در این شرایط فاصله عرض دهانه فلوم به دو بخش ($B_c/2$) تقسیم می‌شود.

شبیه‌سازی عددی

نتایج داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده توسط Vatankhah and Mohammadi, (2020) ابتدا برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل Flow3D استفاده شد. سپس مشخصات شبیه‌سازی تأیید شده برای دیگر شبیه‌سازی‌ها به منظور به دست آوردن داده‌های نهایی مورد نیاز استفاده شد. برای مرحله کالیبراسیون، فلوم smbf مورد بررسی با مقدار

تنگ‌شدگی و اعمال آن در روابط انرژی، معادله‌ای باهدف تحلیل آبگذری جریان در این نوع فلوم‌ها در شرایط جریان آزاد استخراج شد. (محمدی و وطن‌خواه، ۱۳۹۹) به بررسی فلوم اندازه‌گیری جریان با دیواره‌های مخروطی و استوانه‌ای شکل در محیط آزمایشگاهی پرداختند. در نهایت با مطالعه نظری و آزمایشگاهی خصوصیات جریان عبوری از سازه‌های استوانه‌ای و مخروطی شکل در شرایط جریان آزاد، معادلاتی را به جهت تخمین دبی عبوری جریان در یک کانال مستطیلی توسعه داده‌اند. (عباسی و ولی‌زادگان، ۱۴۰۱) به محاسبه دبی و ضریب دبی جریان زیر بحرانی در فلوم‌های دوزنقه‌ای با پایه منشوری در شرایط جریان آزاد پرداختند. بر اساس نتایج و ارزیابی‌های صورت گرفته از مدل‌های آزمایشگاهی متعدد، در تحلیل اول با استفاده از تحلیل ابعادی رابطه و نموداری باهدف محاسبه میزان دبی عبوری جریان به‌طور جداگانه برای هر شیب جانبی و یک رابطه برای تمامی شیب‌های جانبی بررسی شده ارائه شد. در تحلیل دوم با استفاده هم‌زمان از مفهوم اصل انرژی و تحلیل ابعادی رابطه و نمودار محاسبه میزان ضریب دبی عبوری جریان برای هر شیب جانبی به‌طور جداگانه و رابطه‌ای کلی برای تمامی شیب‌های جانبی بررسی شده به دست آمد. نتایج نشان داد که تحلیل دوم برای محاسبه دبی جریان نسبت به تحلیل اول مناسب‌تر بوده و از دقت بیشتری برخوردار است.

باتوجه به پژوهش‌های گذشته، تاکنون تمامی مطالعات مرتبط با فلوم‌های smbf به‌طور عمده در حالت ساده انجام شده است و تأثیر استفاده از فلوم‌های smbf چندگانه به جای حالت ساده این فلوم مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این پژوهش به منظور نوآوری تحقیق، اثر کاربرد چهار نیم استوانه کوچک‌تر به جای دونیم استوانه بر خصوصیات هیدرولیکی جریان مانند سرعت حداکثر، استهلاک انرژی و گردابه‌های جریان باهدف افزایش کارایی و انعطاف‌پذیری و همچنین ارتقا و صرفه‌جویی در هزینه‌های طراحی و ساخت، در شبکه‌های بهره‌برداری و انتقال آب در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱. الف) نمای کلی فلوم آزمایشگاهی ب) نمای کلی فلوم smbf در دو حالت ساده و چندگانه

جدول ۱. جزئیات تشکیل دهنده فلوم آزمایشگاهی

شماره	توضیحات	شماره	توضیحات
۱	مخزن اصلی	۷	محل قرائت سرریز لبه تیز مستطیلی
۲	پمپ آب	۸	سرریز مستطیلی
۳	مخزن هوایی	۹	دریچه دوطرفه
۴	کانال آزمایشگاهی	۱۰	مخزن اندازه‌گیری
۵	دریچه کشویی		
۶	سرریز لبه تیز مثلثی		

مقادیر اندازه‌گیری شده سطح آب در آزمایشگاه مطابقت داشته باشد. در این پژوهش به منظور بررسی عملکرد فلوم‌های از نوع smbf در دو حالت ساده و چندگانه و مقایسه این دو نسبت به یکدیگر در مجموع از ۱۸ شبیه‌سازی انجام شد (جدول ۲).

دبی ۶/۵۷۷ لیتر بر ثانیه، عرض دهانه فلوم ($B_c=0.075$) متر شبیه‌سازی شد. با تغییر تعداد سلول مش و با انتخاب مدل آشفتگی، مدل شبیه‌سازی شده در نرم افزار Flow3D به گونه‌ای شد که نتایج شبیه‌سازی مستقل از تعداد سلول مش بوده و به خوبی با

جدول ۲. مشخصات هیدرولیکی استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها برای فلوم SMBF در دو حالت ساده و چندگانه

n	Q (l/s)	B (m)	Bc (m)	n	Q (l/s)	B (m)	2 (Bc/2) (m)
۱	۵	۰/۲۵	۰/۰۷۵	۱۰	۵	۰/۲۵	۰/۰۷۵
۲	۵	۰/۲۵	۰/۱	۱۱	۵	۰/۲۵	۰/۱
۳	۵	۰/۲۵	۰/۱۵	۱۲	۵	۰/۲۵	۰/۱۵
۴	۵	۰/۲۵	۰/۰۷۵	۱۳	۱۵	۰/۲۵	۰/۰۷۵
۵	۱۵	۰/۲۵	۰/۱	۱۴	۱۵	۰/۲۵	۰/۱
۶	۱۵	۰/۲۵	۰/۱۵	۱۵	۱۵	۰/۲۵	۰/۱۵
۷	۳۰	۰/۲۵	۰/۰۷۵	۱۶	۳۰	۰/۲۵	۰/۰۷۵
۸	۳۰	۰/۲۵	۰/۱	۱۷	۳۰	۰/۲۵	۰/۱
۹	۳۰	۰/۲۵	۰/۱۵	۱۸	۳۰	۰/۲۵	۰/۱۵

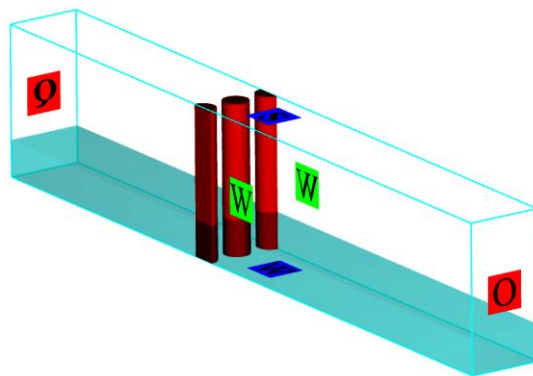
مش‌بندی و شرایط مرزی

در این پژوهش از یک بلوک مش‌بندی استفاده شده که تمامی فضای شبیه‌سازی و سازه را شامل می‌شود. (شکل ۲) شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی است. شرایط مختلف مرزبندی در شبکه سلول محاسباتی به شکل مرز ورودی به صورت دبی ورودی (Q)، مرز خروجی نیز به علت خروج جریان به صورت جریان خروجی (O) انتخاب شد. دیواره‌های جانبی شبکه سلول‌های محاسباتی و همچنین کف بلوک مش‌بندی در حالت دیوار (W) تنظیم شده و سقف این بلوک نیز به علت وجود هوا به صورت شرط مرزی متقارن (S) در نظر گرفته شده است. (شکل ۲) در این پژوهش برای بلوک مش‌بندی، تعداد مش‌های ۵۰۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج انتخاب تعداد سلول مش‌بندی مناسب در جدول ۳ آمده است. در طول فرایند اعتبارسنجی، همگرایی حل عددی حالت پایدار با نظارت بر دبی در واحد عرض (q) و با تغییرات در ورودی و خروجی حوزه شبیه‌سازی بررسی شد. (شکل ۳) تغییرات زمانی را با دبی در واحد عرض در دو سری از آزمایش‌های (Vatankhah and Mohammadi, 2020) با عرض دهانه فلوم ($Bc=0.221$) متر و در دبی $39/836$ و $44/033$ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. شکل ۳ نشان می‌دهد که زمان $t = 35.0$ ثانیه

۹ شبیه‌سازی از فلوم smbf در حالت ساده با دبی‌های ۵، ۱۵ و ۳۰ لیتر بر ثانیه و عرض دهانه فلوم ($Bc=0.075, 0.1, 0.15$) متر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین ۹ شبیه‌سازی از فلوم‌های smbf چندگانه با دبی و میزان بازشدگی یکسان صورت گرفت. در جدول ۲، n (شماره شبیه‌سازی)، Q (دبی عبوری جریان)، B (عرض فلوم)، Bc (عرض دهانه فلوم smbf) و $2(Bc/2)$ (مجموع عرض هر دو دهانه فلوم) است.

مدل‌های آشفتگی

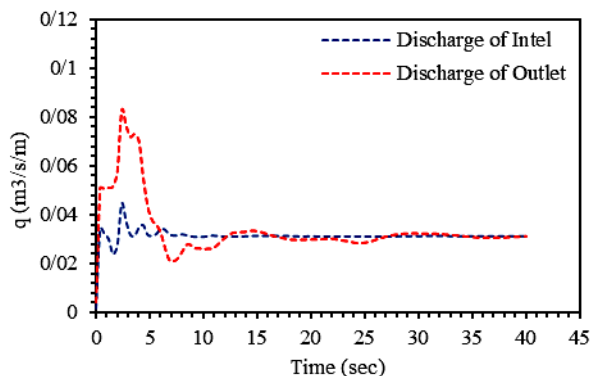
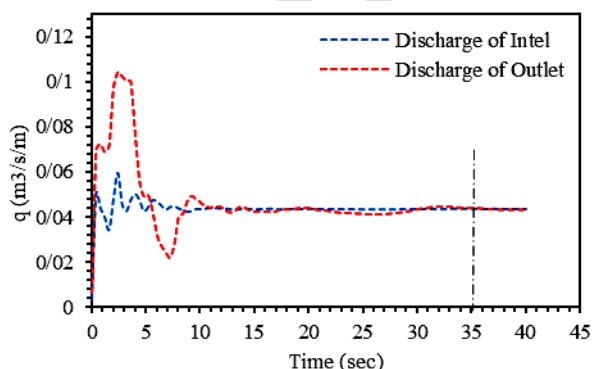
مدل‌های آشفتگی شامل، مدل‌های صفر معادله‌ای، مدل‌های تک معادله‌ای، مدل‌های ($k-\epsilon$)، مدل‌های (RNG)، مدل‌های (LES) که متداول‌ترین آن‌ها در بحث سازه‌های هیدرولیکی مدل‌های ($k-\epsilon$)، (RNG) و (LES) است. مدل RNG برای توصیف آشفتگی با شدت کم و جریان‌هایی که دارای مناطق برشی قوی هستند با دقت بیشتری نسبت به مدل استاندارد $K-\omega$ شناخته می‌شود، بنابراین مدل RNG کاربرد وسیع‌تری نسبت به $K-\omega$ دارد. علاوه بر این گردابه‌هایی که در اطراف دریچه تشکیل می‌شوند توسط مدل RNG با دقت بیشتری شبیه‌سازی می‌شوند. همچنین مدل آشفتگی $K-\epsilon$ به دلیل این که دارای تحلیل‌های دو معادله‌ای بوده و ضرایب تقریباً ثابتی دارد نسبت به RNG از دقت کمتری برخوردار است.



شکل ۲. شرایط مرزی اعمال شده در شبیه‌سازی

جدول ۳. نتایج آماری مش‌بندی، مدل آشفتگی و کالیبراسیون با مدل آزمایشگاهی در دبی ۶/۵۷۷ لیتر بر ثانیه و عرض دهانه فلوم ($B_c=0.075m$)

Accepted	RMSE (m)	MAPE (%)	Y (Num) (m)	Y (exp) (m)	T-model	Mesh	Q (l/s)	Bc(m)	N
	۰/۰۰۶۱۳۰۴	۱/۱۵۲۲۳	۰/۱۲۰۱	۰/۱۲۱۵	RNG		۶/۵۷۷	۰/۰۷۵	۱
	۰/۰۰۶۷۵۱۲	۱/۳۹۹۱۷۶	۰/۱۱۹۸	۰/۱۲۱۵	K-ε	۵۰۰۰۰۰			۲
	۰/۰۱۲۳۶۳۷	۴/۷۷۳۶۶۲	۰/۱۱۵۷	۰/۱۲۱۵	K-ω				۳
←	۰/۰۰۲۷۴۴۳	۰/۲۴۶۹۱۳	۰/۱۲۱۲	۰/۱۲۱۵	RNG				۴
	۰/۰۰۳۶۷۰۵	۰/۴۱۱۵۲۲	۰/۱۲۱	۰/۱۲۱۵	K-ε	۱۰۰۰۰۰۰			۵
	۰/۰۰۶۵۵۱	۱/۳۱۶۸۷۲	۰/۱۱۹۹	۰/۱۲۱۵	K-ω				۶
	۰/۰۰۵۹۰۸۷	۱/۰۶۹۹۵۸۸	۰/۱۲۰۲	۰/۱۲۱۵	RNG				۷
	۰/۰۰۶۱۳۰۴	۱/۱۵۲۶۳۳	۰/۱۲۰۱	۰/۱۲۱۵	K-ε	۲۰۰۰۰۰۰			۸
	۰/۰۱۲۳۶۳۷	۴/۷۷۳۶۶۲۵	۰/۱۱۵۷	۰/۱۲۱۵	K-ω				۹



شکل ۳. تغییرات زمانی با دبی در واحد عرض (q) در ورودی و خروجی حوزه شبیه‌سازی برای عرض دهانه فلوم ($B_c=0.221m$)، در دبی‌های الف) ۴۰/۰۳۳ لیتر بر ثانیه ب) ۳۹/۸۳۶ لیتر بر ثانیه

سرعت حداکثر بوده و محور افق مربوط به بازشدگی‌های بدون بعد بوده که به صورت Bc/B نشان داده شده است که در آن Bc عرض دهانه فلوم بوده و B عرض کانال است. باتوجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که سرعت حداکثر با دبی عبوری جریان رابطه مستقیم داشته و با میزان بازشدگی رابطه عکس خواهد داشت. به این صورت که با افزایش دبی در بازشدگی‌های ثابت مقدار v_{max} افزایش یافته و با افزایش میزان بازشدگی فلوم (کاهش عرض دهانه فلوم) این پارامتر مرتباً کاهش خواهد یافت. بررسی‌ها نشان می‌دهد که حداکثر سرعت جریان ایجاد شده بر فلوم‌های SMBF چندگانه به مراتب بیشتر از زمانی است که از فلوم‌های SMBF ساده استفاده می‌شود. این پدیده به دلیل کاهش دهانه فلوم و افزایش فشار جریان آب است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که در زمان استفاده از فلوم‌های SMBF چندگانه به جای فلوم‌های SMBF ساده سرعت حداکثر در بازشدگی‌های $(Bc=0.075, 0.1, 0.15)$ متر به‌طور میانگین در دبی ۵ لیتر بر ثانیه ۱۲ درصد، در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه ۱۹ درصد و در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه ۱۰ درصد در مقایسه با فلوم‌های SMBF ساده افزایش یافته است. بیشترین میزان افزایش سرعت فلوم‌های SMBF چندگانه مربوط به دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه و عرض دهانه فلوم $(Bc=0.1m)$ به مقدار ۲۵ درصد و کمترین میزان افزایش سرعت مربوط به دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و عرض دهانه فلوم $(Bc=0.075m)$ با مقدار ۶ درصد است.

اثر بازشدگی بدون بعد (Bc/B) بر اتلاف انرژی (ΔE)

افت انرژی جریان $(\Delta E = \frac{E_1 - E_2}{E_1})$ ، برای توصیف رفتار جریان در اطراف فلوم‌های SMBF مهم است. E_1 مقدار انرژی در بالادست فلوم $(E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g})$ و E_2 انرژی در پایین‌دست فلوم است $(E_2 = y_2 + \frac{V_2^2}{2g})$. در رابطه‌ی معرفی شده، y ارتفاع آب و v سرعت آب در مقطع مورد نظر است. پس از ارزیابی نتایج و محاسبات صورت گرفته به بررسی تغییرات

برای دستیابی به یک وضعیت پایدار برای دو تخلیه اتخاذ شده مناسب بود؛ بنابراین، و برای احتیاط بیشتر، زمان اجرای شبیه‌سازی روی ۴۰ ثانیه تنظیم شد.

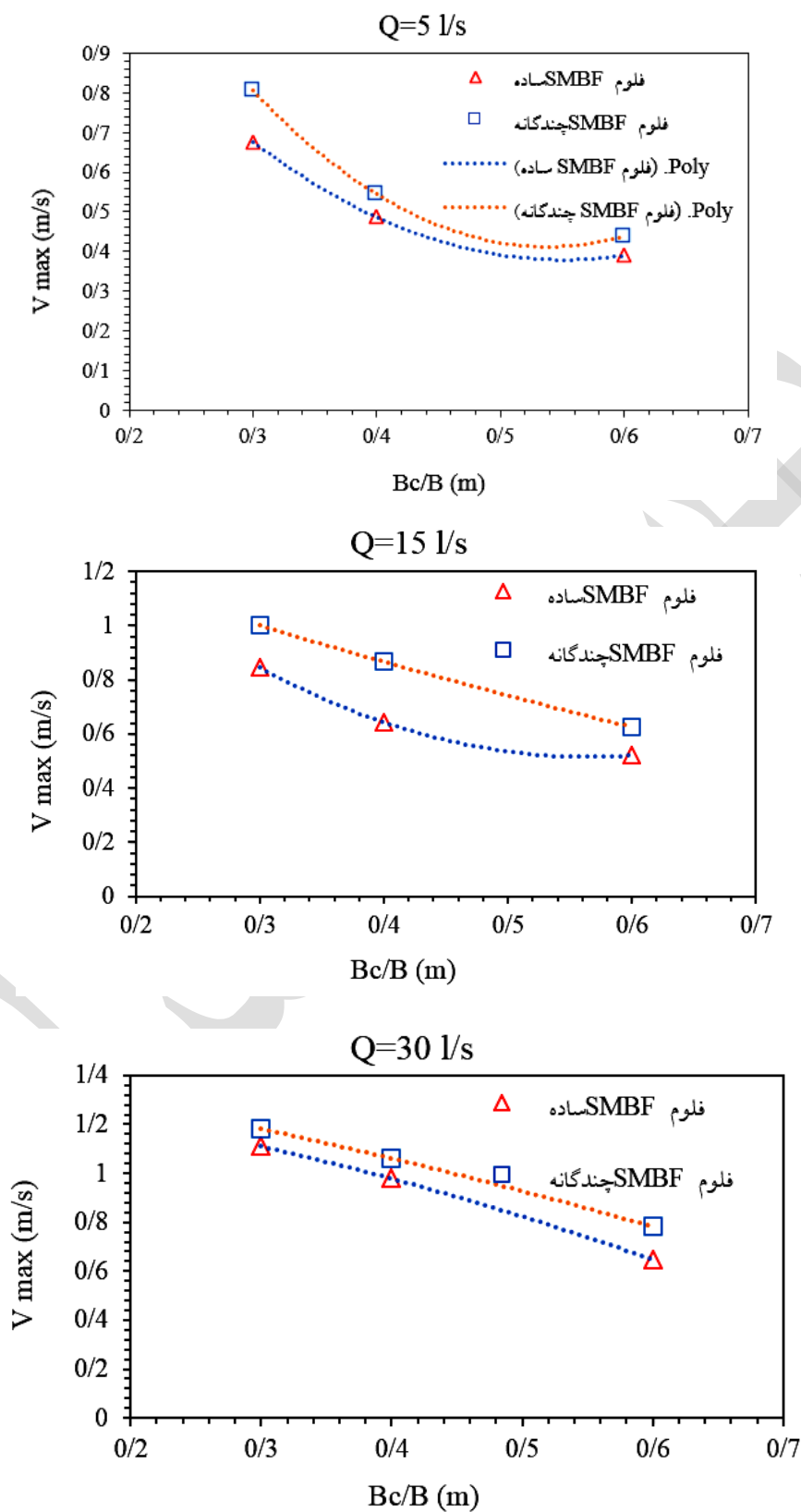
انتخاب مش‌بندی، مدل آشفتگی و کالیبراسیون

نتایج شبیه‌سازی عددی فلوم SMBF (Vatankhah and Mohammadi, 2020) با دبی ۶/۵۷۷ لیتر بر ثانیه، عرض دهانه فلوم $(Bc=0.075m)$ ، در تعداد سلول مش‌بندی و مدل‌های آشفتگی مختلف در جدول ۳ آورده شده و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. جدول ۳ میزان خطا را برای معیارهای مختلف RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا)، MAPE (میانگین درصد مطلق خطا) و MSE (میانگین مربعات خطا) مربوط به مقایسه عمق بالادست برداشت شده فلوم SMBF بررسی شده در محیط آزمایشگاهی نسبت به عمق بالادست برداشت شده فلوم SMBF شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزاری را در تعداد سلول مش و مدل‌های آشفتگی مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در بین ۹ شبیه‌سازی صورت گرفته و انتخاب تعداد سلول‌های مش‌بندی و مدل‌های آشفتگی مختلف، بهترین عملکرد، در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده، توسط مدل‌های RNG و تعداد سلول‌های مش‌بندی ۱۰۰۰۰۰۰ به دست آمد. برای صحت سنجی مدل آشفتگی و تعداد سلول مش‌بندی از معیارهای محاسباتی نام‌برده استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد نتایج در محدوده قابل‌قبولی از خطاها قرار دارد. در نتیجه در این پژوهش برای تمامی شبیه‌سازی‌ها از مدل آشفتگی RNG و تعداد سلول مش‌بندی ۱۰۰۰۰۰۰ استفاده شد.

بحث و نتایج

اثر بازشدگی بدون بعد (Bc/B) بر سرعت حداکثر (V_{max})

شکل‌های ۴ تغییرات سرعت حداکثر (V_{max}) را نسبت به بازشدگی‌های بی بعد شده (Bc/B) و در دبی‌های (۵، ۱۵ و ۳۰) لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. محور عمود مربوط به میزان



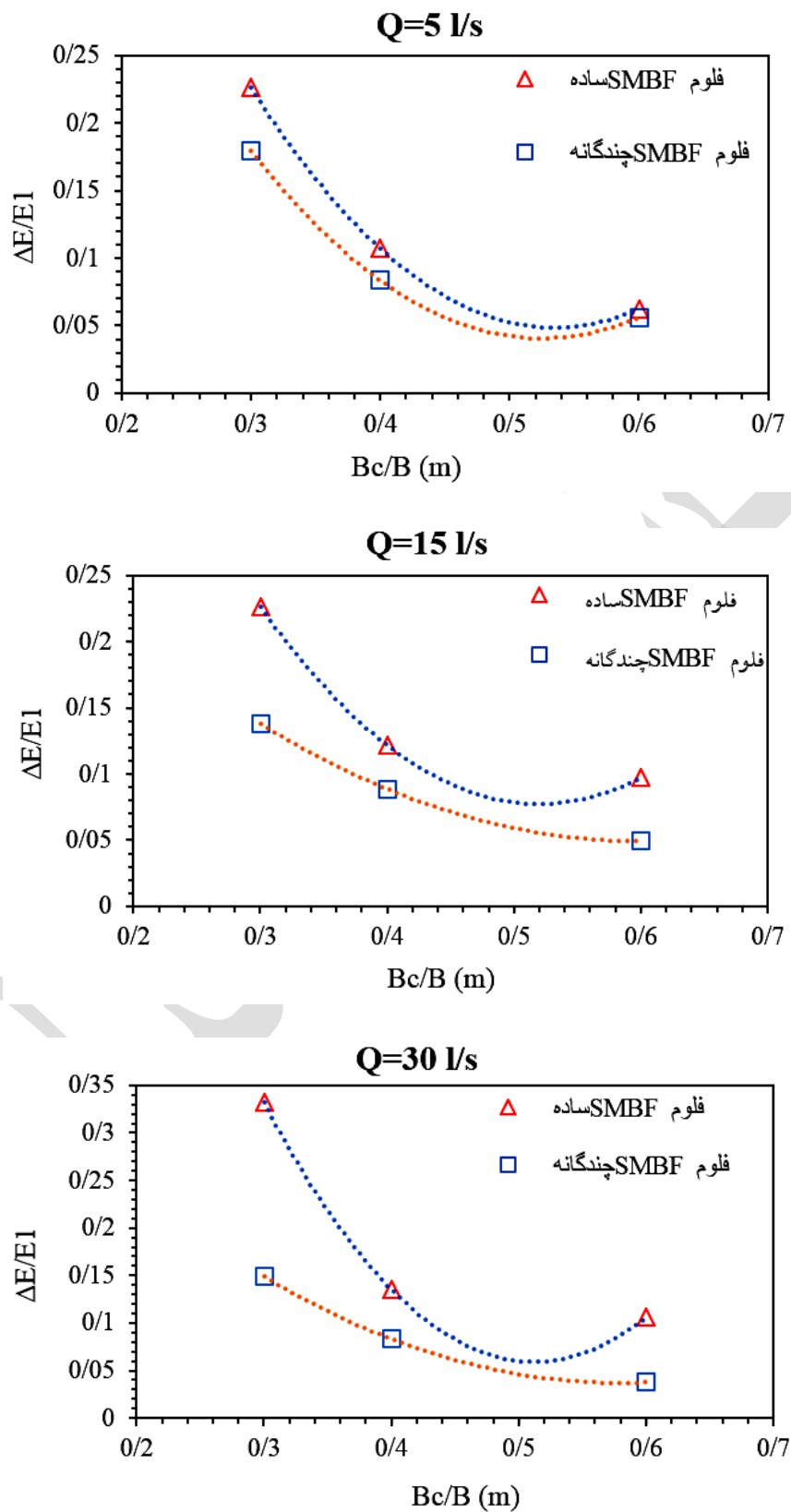
شکل ۴. تغییرات سرعت حداکثر نسبت به تغییرات بازشدگی

استهلاک انرژی نسبت به تغییرات میزان بازشدگی بدون بعد پرداخته شد. محور عمود مربوط به میزان استهلاک انرژی بدون بعد ($\Delta E/E_1$) بوده و محور افق مربوط به بازشدگی های بدون بعد بوده که به صورت Bc/B نشان داده شده است که در آن Bc عرض دهانه فلوم بوده و B عرض کانال است. شکل ۵ نشان میدهد که میزان استهلاک انرژی با دبی عبوری جریان رابطه مستقیم دارد، به طوری که با افزایش دبی جریان میزان افت انرژی افزایش می یابد. علاوه بر این مقدار استهلاک انرژی فلوم ها با تغییرات بازشدگی بدون بعد (Bc/B) رابطه معکوس دارد، به شکلی که با افزایش میزان بازشدگی فلوم ها، استهلاک انرژی مرتباً کاهش پیدا میکند. همچنین نتایج نشان میدهد که در هنگام استفاده از فلوم های SMBF چندگانه استهلاک انرژی در مقایسه با زمان استفاده از فلوم های SMBF ساده کاهش خواهد یافت. استهلاک انرژی فلوم های SMBF چندگانه در بازشدگی های ($Bc=0.075, 0.1, 0.15$) متر به طور میانگین در دبی ۵ لیتر بر ثانیه ۲۱ درصد، در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه ۶۶ درصد و در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه ۱۲۲ درصد در مقایسه با فلوم های SMBF ساده کاهش یافته است. بیشترین کاهش میزان استهلاک انرژی فلوم در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه و میزان بازشدگی ($Bc=0.15$) متر اتفاق افتاده که مقدار آن ۱۸۱ درصد است. کمترین میزان کاهش استهلاک انرژی نیز در دبی ۵ لیتر بر ثانیه و میزان بازشدگی ($Bc=0.15$) متر با مقدار ۱۱ درصد رخ داده است. به همین خاطر توصیه می شود در این سازه ها از چنین بازشدگی هایی استفاده نشود زیرا به دلیل افت انرژی بالا در این میزان بازشدگی ها باید از سازه های اضافی برای کنترل سطح آب استفاده کرد که این امر باعث افزایش هزینه های اجرایی می شود.

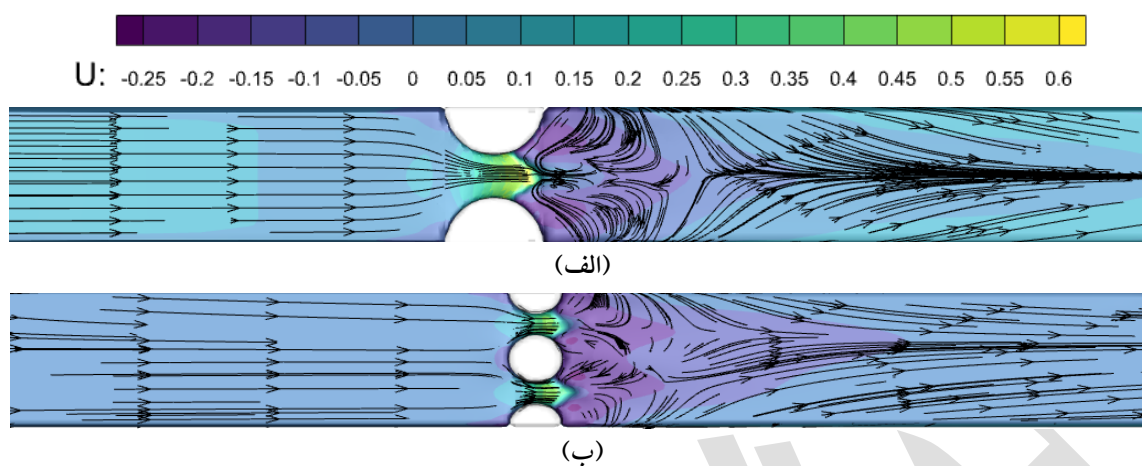
الگوی جریان در محدوده دریچه های سالونی

جریان گردابی مشکلات زیادی برای تأسیسات هیدرومکانیکی آبیگرها ایجاد می کند. از جمله این مشکلات می توان به ورود هوا به مجرای آبیگر و عملکرد نامناسب ماشین های

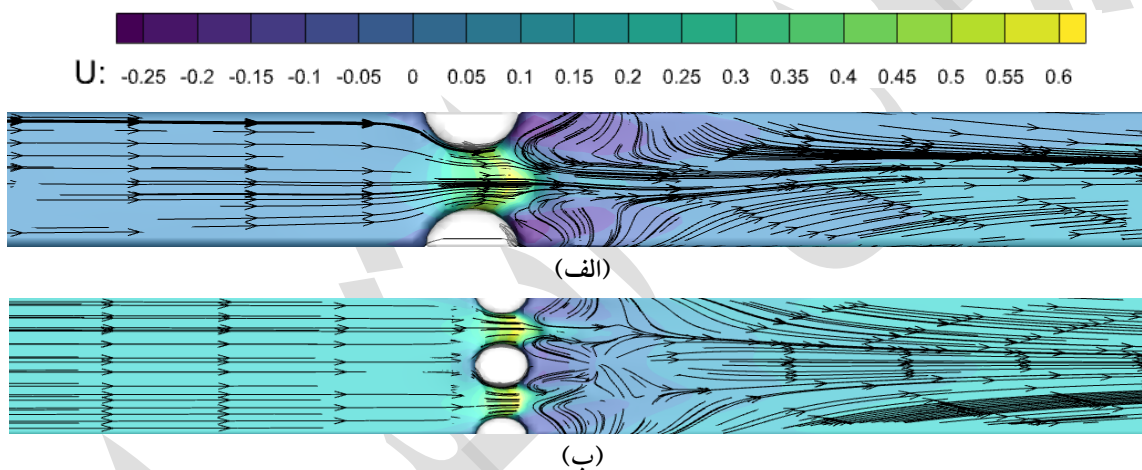
هیدرولیکی و مکش اجسام به دهانه آبیگر اشاره کرد. (Knauss, 1987) در این پژوهش به بررسی الگوی جریان بر روی فلوم های SMBF در دو حالت ساده و چندگانه و مقایسه آنان با یکدیگر پرداخته شده است. با توجه به شکل های ۶ تا ۸ خطوط جریان در دبی ثابت ۵ لیتر بر ثانیه و بازشدگی های ($Bc=0.075, 0.1, 0.15$) متر برای فلوم های SMBF در دو حالت ساده و چندگانه ترسیم شده است. راهنمای آبی، سبز و زرد در شکل های ۶ تا ۸ نشان دهنده تغییرات سرعت در بخش های مختلف کانال است. به توجه به راهنمای تغییرات سرعت و بررسی های صورت گرفته، مشخص شد که در هنگام استفاده از فلوم های SMBF در حالت ساده گردابه ها و تلاطم با ابعاد بزرگ تر نسبت به فلوم های SMBF در حالت چندگانه به وجود می آید. این پدیده می تواند باعث بروز مشکلاتی نظیر افزایش افت انرژی، کاهش نرخ آبیگری، کاهش راندمان ماشین های هیدرولیکی و عملکرد نامناسب آن ها شود. شکل های ۶ و ۸ خطوط ترسیم شده نشان می دهد که جریان در هنگام عبور از فلوم های SMBF در دو حالت ساده و چندگانه به مرکز منحرف شده که این امر باعث ایجاد گردابه هایی بزرگ با کشیدگی طولی زیاد در اطراف و در نزدیکی دیواره های کانال می شود. گردابه های تشکیل شده در اطراف و پایین دست فلوم های نصب شده، موجب ایجاد ارتعاش و خوردگی در بدنه این فلوم ها، سبب کاهش عمر و افزایش هزینه های بهره برداری این سازه ها می شود. این گردابه ها رشد لایه مرزی را مختل کرده و در نهایت باعث افزایش انتقال حرارت بین سیال و سطح مجاور آن می شوند (Biswas et al, 1996). با توجه به شکل های ۶ تا ۸ مشاهده می شود که در زمان بهره وری از فلوم های SMBF چندگانه در مقایسه با فلوم های SMBF ساده وسعت گردابه ها کاهش یافته و تعداد گردابه ها و ناحیه تلاطم جریان افزایش پیدا کرده است. در نهایت با بررسی های صورت گرفته مشخص شد که وسعت گردابه با عرض دهانه فلوم رابطه عکس دارد. هنگامی که عرض دهانه فلوم افزایش یابد، شدت گردابه ها و وسعت ناحیه تلاطم جریان در اطراف فلوم کاهش پیدا می کند.



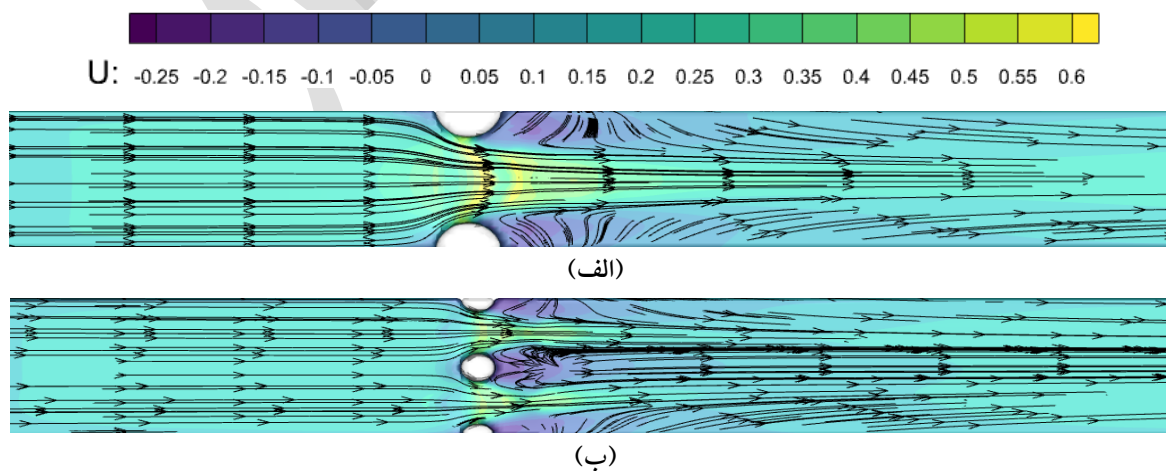
شکل ۵: تغییرات استهلاک انرژی نسبت به تغییرات بازشدگی بدون بعد



شکل ۶. خطوط جریان بر روی فلوم‌های SMBF (الف) ساده (ب) چندگانه در بازشدگی ($Bc=0.075m$) و دبی ۵ لیتر بر ثانیه



شکل ۷. خطوط جریان بر روی فلوم‌های SMBF (الف) ساده (ب) چندگانه در بازشدگی ($Bc=0.1m$) و دبی ۵ لیتر بر ثانیه



شکل ۸. خطوط جریان بر روی فلوم‌های SMBF (الف) ساده (ب) چندگانه در بازشدگی ($Bc=0.15m$) و دبی ۵ لیتر بر ثانیه

نتیجه گیری

فلوم‌های SMBF در دو حالت ساده و چندگانه، می‌تواند به‌عنوان نسل جدیدی از فلوم‌ها با ویژگی‌های عملکردی خاص برای مدیریت کانال‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی و نرم‌افزار Flow3D، تأثیر استفاده از فلوم‌های SMBF در مقایسه با فلوم‌های SMBF ساده، سرعت حداکثر جریان، استهلاك انرژی و گردابه‌های جریان مورد ارزیابی قرار گرفت. موارد زیر را می‌توان به‌عنوان نتایج کلیدی تحقیق ذکر کرد:

۱- نتایج نشان داد که سرعت حداکثر با دبی عبوری جریان رابطه مستقیم داشته و با میزان بازشدگی رابطه عکس خواهد داشت. به این صورت که با افزایش دبی در بازشدگی‌های ثابت مقدار v_{max} افزایش یافته و با افزایش میزان بازشدگی فلوم (کاهش عرض دهانه فلوم) این پارامتر مرتباً کاهش خواهد یافت. همچنین نتایج نشان داد که حداکثر سرعت جریان ایجاد شده بر فلوم‌های SMBF چندگانه به مراتب بیشتر از زمانی است که از فلوم‌های SMBF ساده استفاده می‌شود.

۲- بررسی‌ها نشان داد که میزان استهلاك انرژی با دبی عبوری جریان رابطه مستقیم دارد، به‌طوری‌که با افزایش دبی جریان میزان افت انرژی افزایش می‌یابد. همچنین مقدار

استهلاك انرژی در این نوع از فلوم‌ها با تغییرات بازشدگی رابطه معکوس دارد، به شکلی که با افزایش میزان بازشدگی فلوم‌ها، استهلاك انرژی مرتباً کاهش پیدا می‌کند. در نهایت نتایج نشان داد که در هنگام استفاده از فلوم‌های SMBF چندگانه استهلاك انرژی در مقایسه با زمان استفاده از فلوم‌های SMBF ساده کاهش خواهد یافت.

۳- نتایج نشان داد که جریان در هنگام عبور از فلوم‌های SMBF در دو حالت ساده و چندگانه به مرکز منحرف شده که این امر باعث ایجاد گردابه‌هایی بزرگ با کشیدگی طولی زیاد در اطراف و در نزدیکی دیواره‌های کانال می‌شود. همچنین مشاهده شد که در زمان بهره‌وری از فلوم‌های SMBF چندگانه در مقایسه با فلوم‌های SMBF ساده وسعت گردابه‌ها کاهش یافته و تعداد گردابه‌ها و ناحیه تلاطم جریان افزایش پیدا کرده است.

۴- بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی و تحلیلی پژوهش حاضر، کاربرد فلوم‌های SMBF چندگانه مورد بررسی به‌دلیل بهبود در عملکرد پارامترهای هیدرولیکی در مقایسه با فلوم‌های SMBF ساده، به‌عنوان یک ابزار اندازه‌گیری و کنترل جریان قابل اطمینان و حمل آسان در شرایط جریان آزاد در کانال‌های روباز پیشنهاد می‌شود.

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, Valizadegan, & Ebrahim. (2023). Calculation of flow rate and flow coefficient of subcritical flow in trapezoidal flumes with prism base in free flow conditions. *Amirkabir Engineering Journal*, 55(1), 131-144
2. Aminpour, Y. Vatanikhah, A. Farhodi, J. (2019). Discharge Analysis of SMBF Flumes in Free and Submerged Flow Conditions, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(7), 1635-1649.
3. Baiamonte, G., & Ferro, V. (2007). Simple flume for flow measurement in sloping open channel. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(1), 71-78.
4. Biswas, G., Torii, K., Fujii, D., & Nishino, K. (1996). Numerical and experimental determination of flow structure and heat transfer effects of longitudinal vortices in a channel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(16), 3441-3451.
5. Carollo, F. G. Di Stefano, C. Ferro, V. and Pampalone, V. (2016). New Stage-Discharge Equation for the SMBF Flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(5).
6. Di Stefano, C. Di Piazza, G. V. and Ferro, V. (2008). Field testing of a simple flume (SMBF) for flow measurement in open channels. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 134(2), 235- 240.
7. Hager, W. H. (1986). Modified, trapezoidal Venturi channel. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 112(3), 225-241.

8. Mohammadi, & Watan Khah. (2020). Flow measurement flume with conical and cylindrical walls. *Iran Water and Soil Research*, 51(7), 1651-1637.
9. Knauss, j., "Swirling flow problems at intakes", Balkema, 1987
10. Parsaie, A., Dehdar-Behbahani, S., Devi, G. S. L., Haghiabi, A., & Afaridegan, E. (2023). The discharge coefficient of SMBF flumes under free and submerged conditions. *Applied Water Science*, 13(12), 236.
11. Samani, Z. Jorat, S. and Yousaf, M. (1991). Hydraulic characteristics of circular flume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(4), 558-566.
12. Samani, Z. and Magallanez, H. (2000). Simple flume for flow measurement in open channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(2), 127-129.
13. Süme, V. (2024). Numerical simulation of supercritical flow in sudden contractions flumes. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, jws2024149.
14. Vatankhah, A. R., & Mohammadi, M. (2020). Stage-discharge equation for simple flumes with semi-cylinder contractions. *SN Applied Sciences*, 2, 1-13.