

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی عددی الگوی جریان، پروفیل بستر و تنش برشی اطراف پایه مستطیلی با Flow 3D

پانیذ رویانی^۱، سید حسین حسینی^{۲*}، خلیل اژدری^۳، صمد امامقلی زاده^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

چکیده

از جمله پدیده‌های پیچیده در مهندسی هیدرولیک رسوب، آبستگي در اطراف پایه‌های پل‌ها است. با توجه به الگوی سه‌بعدی و پیچیده جریان در اطراف پایه‌ها، اندازه‌گیری برخی از پارامترهای هیدرولیکی در حین انجام آزمایش‌ها از قبیل الگوی جریان، تغییرات پروفیل بستر و تنش برشی مشکل است، در این شرایط می‌توان از مدل‌های عددی جهت استخراج نتایج و مطالعات دقیق‌تر بهره برد. هدف از این تحقیق، مدل‌سازی عددی الگوی جریان، تغییرات پروفیل بستر و عمق آبستگي در اطراف پایه مستطیلی با نرم‌افزار Flow 3D و کاربرد نتایج آن در حمایت پایه در برابر آبستگي می‌باشد. نتایج نشان داد، برای پایه هم‌راستا با جریان، شکل حفره و الگوی جریان در اطراف پایه متقارن بود. با زاویه‌دار شدن پایه در قسمت جلو آن مقدار تنش برشی افزایش یافت به طوری که برای پایه ۱۰ درجه بیشترین مقدار آن و در حدود ۰/۵۵ نیوتون بر مترمربع به دست آمد. همچنین نوسانات پروفیل بستر و سطح آب نیز با افزایش زاویه پایه، بیشتر شد. کاربرد صفحات مستغرق، الگوی آبستگي را تغییر داده و با جابجایی رسوبات به جلوی پایه، کاهش آبستگي را به دنبال داشت. افزایش ارتفاع و زاویه صفحات مستغرق نقش حمایتی آن‌ها را بهبود داد. بر اساس نتایج مدل عددی، عمق آبستگي در جلوی پایه هم‌راستا با جریان و صفحات با زاویه ۳۰ درجه، هم‌تراز با بستر، با ارتفاع ۱/۲۵ سانتیمتر و با ارتفاع ۲/۵ سانتیمتر روی بستر، بعد از ۳۰ دقیقه به ترتیب ۳/۱، ۰/۳۵ و ۰/۰۵+ (روی بستر) سانتی‌متر بود. با زاویه‌دار شدن پایه عملکرد صفحات در کنترل آبستگي در قسمت جلوی پایه و در سمت دیوار پرفشار پایه کاهش یافت، اما در سمت دیواره‌ی کم‌فشار، عمق آبستگي نسبت به پایه‌ی بدون زاویه کمتر بود.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، پروفیل بستر، تنش برشی، Flow 3D، صفحات مستغرق

مقدمه

می‌تواند در انتخاب و اجرای اقدامات حمایتی و کنترل آبستگي نقش مهمی ایفا کند. با توجه به الگوی سه‌بعدی جریان در اطراف پایه‌ها، اندازه‌گیری برخی از پارامترهای هیدرولیکی در حین انجام آزمایش‌ها از قبیل الگوی جریان، تغییرات عمق آبستگي و پروفیل بستر و تنش برشی بسیار مشکل است، در این شرایط می‌توان از مدل‌های عددی جهت استخراج نتایج و مطالعات دقیق‌تر در کنار سایر مزیت‌های ممکن از قبیل صرفه‌جویی در وقت و هزینه بهره برد. مدل‌های عددی مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به مدل‌های Fluent و Flow 3D اشاره کرد که در شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولیکی به‌طور وسیعی فراگیر شده است. مطالعات مختلفی در زمینه مدل‌سازی عددی فرآیند آبستگي در اطراف پایه‌ها با شکل‌های مختلف و شناسایی الگوی جریان انجام شده که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره شده است. رادکیوی و همکاران طی تحقیق دریافتند که در منطقه اطراف پایه پل، جریان سه‌بعدی به دلیل تفکیک و پیدایش گردابه‌های مختلف بسیار پیچیده است. پیچیدگی میدان جریان به خاطر فعل‌وانفعال دینامیکی بین جریان و مرز متحرک در طول توسعه

یکی از پدیده‌های مخرب در هیدرولیک رسوب، آبستگي موضعی اطراف پایه پل‌ها می‌باشد که معمولاً با خسارت مالی و جانی همراه است. از این رو بحث حمایت از پایه‌ها در برابر این پدیده همواره موردتوجه محققین قرار داشته است. در فرآیند آبستگي موضعی اطراف پایه‌ها الگوی جریان عامل اصلی است، بنابراین شناسایی آن

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- دانشیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۴- دانشیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(*نویسنده مسئول (Email: sayyedhossein.hosseini@gmail.com)

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.5.14.2

نتایج عددی در زمینه عمق آبستنگی، شکل و توسعه زمانی عمق مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد. نتایج شبیه‌سازی در مورد اندازه حفره تا حدودی بیشتر و در زمینه شیب حفره تا حدودی کمتر از مقادیر مشاهداتی بود (Jia et al, 2018). امارا و همکاران با استفاده از مدل عددی Flow-3D فرایند آبستنگی موضعی را در اطراف پایه‌های پل بررسی کردند. نتایج مدل عددی دقت قابل قبولی در تخمین سطح آب، سرعت جریان و تنش برشی بستر نشان داد اما مقادیر سرعت عمودی را در بالادست پایه کمتر تخمین زد (Omara et al, 2018). کاستوب و بهارات با استفاده از مدل فلوئنت به شبیه‌سازی آب شستگی موضعی اطراف پایه پل پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود به مطالعه الگوی جریان و تأثیر شکل‌های مختلف پایه بر روی آب شستگی پرداختند. آن‌ها بیان کردند مدل‌سازی عددی ابزاری کارا در مطالعه الگوی جریان است که در مقایسه با مدل فیزیکی صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها را به دنبال دارد. همچنین رفتار جریان اطراف پایه متناسب با شکل پایه است (Kastubh and Bharat, 2019). قادری و عباسی آبستنگی موضعی در اطراف پایه با شکل ایرفویل را همراه با طوق و بدون طوق با استفاده از Flow 3D شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد کاربرد طوق در اطراف پایه سبب کاهش عمق آبستنگی در جلو پایه و کاهش قدرت گرداب‌های برخاستگی در پشت پایه می‌شود. آبستنگی ناشی از گرداب‌های نعل اسبی شدیدتر از آب شستگی ناشی از گرداب‌های برخاستگی است (Ghaderi and Abbasi, 2019). عبد و مجید به تأثیر شکل دماغه پایه را بر روی آب شستگی در اطراف گروه پایه با شکل‌های متفاوت به صورت عددی بررسی کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که حداقل عمق آبستنگی مربوط به گروه پایه با شکل دماغه مثلثی است. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش فاصله بین پایه‌ها، عمق آبستنگی کاهش می‌یابد (Abed and Majeed, 2020). یو و ژو به تحقیقی به شبیه‌سازی عددی آبستنگی اطراف پایه پل‌ها با یک شرایط مرزی متلاطم جدید پرداختند. آن‌ها بیان کردند که شرایط مرزی جدید در شبیه‌سازی بهتر آبستنگی بسیار مؤثر است. همچنین روش عددی پیشنهادی می‌تواند با دقت قابل قبولی ماکزیمم عمق آبستنگی را پیش‌بینی کند (Yu and Zhu, 2020). جلال و حسن به شبیه‌سازی سه‌بعدی آبستنگی اطراف پایه استوانه‌ای با استفاده از مدل Flow 3D پرداختند و با نتایج آزمایشگاهی ملویل مقایسه کردند. اختلاف نتایج عددی با آزمایشگاهی در حدود ۱۰٪ بود. آن‌ها بیان کردند که مدل Flow 3D ابزاری کارا در پیش‌بینی و شبیه‌سازی عمق آبستنگی است (Jalal and Hasan, 2020). رسایی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر موقعیت پایه در آبستنگی اطراف پایه پل در یک خم ۹۰ درجه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش همگرایی و تغییر موقعیت پایه موجب افزایش پیوستگی بین خطوط جریان و جریان‌های ثانویه می‌شود، بنابراین

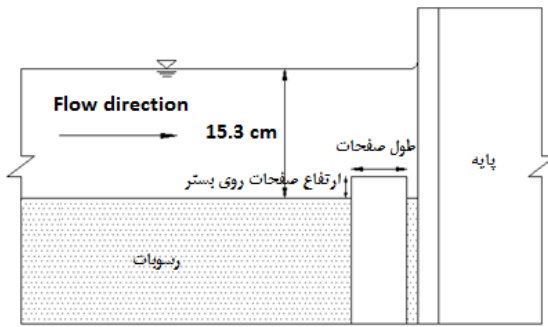
حفره آبستنگی بیشتر نیز خواهد شد (Raudkivi et al, 1985). دی و همکاران با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، یک مدل سه‌بعدی برای شبیه‌سازی میدان جریان اطراف پایه‌های پل دایره‌ای شکل توسعه و نحوه تشکیل گرداب شیاری را مورد ارزیابی قرار دادند (Dey et al, 1995). صلاح‌الدین و همکاران با استفاده از مدل فلوئنت جریان متلاطم اطراف پایه استوانه‌ای قائم را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها به منظور مدل‌سازی از مدل تلاطم k-ε استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل‌های هیدرودینامیک قوی می‌توانند در درک جریان پیچیده و فرآیند شروع آبستنگی در اطراف پایه‌های با اندازه، شکل و ابعاد مختلف مؤثر باشند (Salaheldin et al, 2004). دریندل به صورت آزمایشگاهی و عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت تأثیر پایه دوکی شکل در کاهش گرداب‌های نعل اسبی جلوی پایه و گرداب‌های برخاستگی پشت پایه را مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصله نشان داد، استفاده از مقطع دوکی شکل موجب حذف گرداب‌های برخاستگی گردیده به طوری که آبستنگی در پشت پایه ایجاد نمی‌شود. مقطع دوکی شکل، تأثیری در فرسایش گرداب‌های نعل اسبی بالادست پایه نداشته و آبستنگی ایجادشده در بالادست مشابه حفره آبستنگی در اطراف پایه‌ی استوانه‌ای می‌باشد (Drysedale, 2008). هانگ و همکاران اثرات مقیاس بر روی جریان متلاطم و آبستنگی را به صورت عددی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل‌سازی فیزیکی بدون در نظر گرفتن تشابه رینولدزی منجر به خطاهای قابل ملاحظه در شبیه‌سازی جریان متلاطم و آب شستگی در اطراف پایه پل بزرگ خواهد شد. در مورد سرعت نیز خطاها در طرفین پایه استوانه‌ای بیشتر بود (Haung et al, 2009). دهقانی و همکاران به شبیه‌سازی سه‌بعدی آبستنگی موضعی تحت هیدروگراف جریان‌های مختلف پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کنتورهای تراز بستر در قسمت جلوی پایه مطابقت خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارند (Dehghani et al, 2013). قاسمی و سلطانی گرد فرامرزی آبستنگی موضعی اطراف یک پایه استوانه‌ای را با استفاده از Flow-3D شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مدت زمان شبیه‌سازی ۶۰۰ ثانیه، ماکزیمم عمق آبستنگی برای دبی‌های ۵، ۱۰، ۱۹ و ۳۰ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۰، ۳/۱، ۴/۲ و ۶/۳ به دست آمد. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که عمق آبستنگی در بالادست پایه بیشتر و در پایین دست آن کمتر بود (Ghasemi and soltani, 2017). کاردان و همکاران به بررسی توزیع تنش برشی بستر در اطراف یک پایه دایره‌ای با استفاده از مدل‌های مختلف تلاطم پرداختند. آن‌ها برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار فلوئنت استفاده کردند و به ارزیابی سه مدل k-ε، RSM و LES با مقایسه‌ی الگوی جریان و نوسانات گرداب‌ها پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مدل LES، گرداب‌ها به صورت متقارن بوده و دو گونه گرداب بزرگ در طرفین پایه استوانه‌ای اتفاق می‌افتد (Kardan et al, 2017). جیا و همکاران به شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی آبستنگی اطراف پایه‌های پل پرداختند و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند.

RNG مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. بیشترین درصد کاهش تنش برشی در مدل مقطع دوکی با ابتدای تیز با مقدار ۶۷٪ و کمترین درصد کاهش با مقدار ۳/۵٪ در مدل ترکیب مقطع مستطیلی با مثلث که مثلث در انتهای مقطع قرار گرفته، دیده شده است. بهروزی و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی جریان اطراف تک‌پایه و گروه پایه‌های پشت سرهم، کنار هم و زاویه‌دار نسبت به جهت جریان به کمک مدل عددی فلوئنت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل فلوئنت قابلیت خوبی در شبیه‌سازی جریان اطراف تک‌پایه و گروه پایه پل را دارد. همچنین مقدار میانگین خطای مدل‌سازی سرعت در راستای x برای مدل تک‌پایه و دوپایه پشت سرهم به ترتیب در حدود ۷/۳٪ و ۳/۱۲۵٪ بود. بررسی‌ها نشان داد، مطالعاتی در زمینه الگوی آبشستگی در اطراف پایه‌های مستطیلی با دماغه گرد تحت زوایای مختلف و همچنین شناسایی نقش کنترلی صفحات مستغرق در این نوع پایه‌ها انجام نشده است؛ بنابراین، در این تحقیق هدف شبیه‌سازی فرآیند آبشستگی در اطراف پایه پل مستطیلی با دماغه‌ی گرد با نرم‌افزار Flow 3D و بررسی قابلیت‌های این نرم‌افزار در این زمینه و استخراج نتایج کاربردی از قبیل الگوی جریان، تغییرات عمق و پروفیل بستر می‌باشد. استخراج این نتایج به شناسایی نقاط بحرانی در اطراف پایه کمک نموده و در اجرای اقدامات حمایتی در اطراف پایه و کنترل آبشستگی مؤثر خواهد بود. با نصب صفحات مستغرق در جلوی پایه، عملکرد آن‌ها در کنترل آب شستگی مدل‌سازی شده است.

مدل آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی نتایج مدل عددی از مدل آزمایشگاهی حسینی (۱۳۸۸) استفاده شده است. این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تبریز انجام شده است. این مدل شامل یک فلوم شیشه‌ای-فلزی به طول ۶ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۰/۵ متر بود که به دو قسمت صلب (کف کاذب) و بستر متحرک (پل شده با رسوبات) تقسیم‌بندی شد. بستر متحرک در فاصله‌ی ۲ تا ۵ متری از ابتدای فلوم قرار داشت و ارتفاع آن از کف فلوم ۰/۲ متر بود. آب موردنیاز آزمایش‌ها توسط پمپ از نوع سانتریفیوژ با دبی ۱۰۰ لیتر بر ثانیه تأمین گردید. دبی جریان نیز توسط سرریز نصب‌شده در مخزن انتهایی فلوم اندازه‌گیری شد. جنس پایه مورد استفاده در آزمایشات پلکسی گلاس بود و نسبت طول به عرض پایه با توجه به مطالعه اتما و همکاران (۱۹۹۸) ۴ (طول پایه به‌جز بخش نیم‌دایره ابتدا و انتهای آن ۲۰ سانتیمتر و عرض آن ۵ سانتیمتر) انتخاب شد. صفحات مستغرق مورد استفاده در آزمایشات نیز از جنس ورق گالوانیزه بود و تعداد آن‌ها طبق مطالعه لاجلان (۱۹۹۹) ۶ انتخاب شده است. ضخامت صفحات ۱ میلی‌متر و طول آن‌ها ۱/۵ برابر عرض پایه می‌باشد. شکل ۱، کانال آزمایشگاهی و طرح شماتیک پایه و آرایش صفحات مستغرق را نشان می‌دهد.

ماکزیمم عمق آبشستگی و حجم حفره در نیمه دوم خم و در زاویه ۷۵ درجه اتفاق افتاد (Rasaei et al, 2020). صیادی (۱۳۸۷) میدان جریان و انتقال رسوب در اطراف پایه‌ی پل‌ها و عمق آبشستگی موضعی را با استفاده از روش عناصر محدود شبیه‌سازی نمود. وی برای حل میدان جریان از معادله ناویر استوکس و از توابع مرتبه‌ی دوم برای سرعت‌ها و خطی برای فشار، استفاده کرد. بشارتی و حکیم زاده (۱۳۸۹) به شبیه‌سازی عددی الگوی جریان اطراف یک پایه استوانه‌ای و چهار پایه مخروطی با نرم‌افزار فلوئنت پرداختند. بررسی میدان تنش برشی بستر جریان در اطراف پایه‌های استوانه‌ای و مخروطی شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که استفاده از پایه‌های مخروطی به‌جای پایه استوانه‌ای منجر به کاهش قابل‌ملاحظه تنش برشی حداکثر بستر در مجاورت پایه می‌شود. به علاوه، با به‌کارگیری پایه مخروطی سرعت‌های قائم در پاشنه بالادست پایه که از عوامل تأثیرگذار بر آبشستگی بستر این ناحیه می‌باشد کاهش می‌یابد. محجوب و همکاران (۱۳۹۳) آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه پل را با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت مدل‌سازی نمودند. آن‌ها برای آشفته‌گی میدان جریان از مدل آشفته‌گی RNG- $k-\epsilon$ بهره گرفتند. نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شد که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل عددی بود. حسینی و همکاران (۱۳۹۳) حفره‌ی آب شستگی اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره‌ی قائم را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مدل‌سازی کردند. آن‌ها در پژوهش خود، چگونگی تشکیل گردابه‌های نعل اسبی و ایجاد حفره‌ی آب شستگی ناشی از آن را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد این مدل عددی، قابلیت بالایی در شبیه‌سازی جریان و مدل‌سازی انتقال رسوب و پیش‌بینی عمق آبشستگی دارد. عباس‌نیا و محجوب (۱۳۹۴) با استفاده از مدل عددی Flow-3D تأثیرات طوق دایروی شکل را بر روی الگوی آبشستگی در مجاورت پایه‌های پل مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با نزدیک شدن طوق به بستر کانال مقدار تنش برشی به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. باباگلی و رضانی (۱۳۹۵) با استفاده از مدل Flow-3D قابلیت مدل‌های مختلف آشفته‌گی را در تخمین تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب بررسی کردند و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. مطابق نتایج آن‌ها مدل آشفته‌گی RNG بیشترین مطابقت را با نتایج آزمایشگاهی داشت و به‌خوبی الگوی تنش برشی را پیرامون تکیه‌گاه پل پیش‌بینی کرد. نظری شریبان و همکاران (۱۳۹۶) آبشستگی در اطراف پایه پل تحت شرایط آب زلال و بستر ماسه‌ای یکنواخت را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D مدل‌سازی کردند و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. نتایج نشان داد، نرم‌افزار Flow-3D قادر است حداکثر عمق آب شستگی در اطراف پایه‌های پل را در حالت‌های مختلف به‌خوبی پیش‌بینی نماید. کاردان و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی عددی سه‌بعدی میدان جریان اطراف پایه‌های پل با مقاطع هندسی مختلف با مدل فلوئنت پرداختند و تأثیر آن‌ها را بر کاهش تنش برشی بستر بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نتایج مدل



شکل ۱- مدل آزمایشگاهی، الف: کانال آزمایشگاهی همراه با پایه، ب: طرح شماتیک پایه و صفحات مستغرق

مدل عددی

به منظور شبیه سازی عددی از نرم افزار Flow 3D استفاده گردید. این مدل یک نرم افزار کامپیوتری چندمنظوره برای مدل سازی جریان سیال، انتقال حرارت و واکنش شیمیایی است که تولید، توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow Science, Inc صورت گرفته است. این نرم افزار از روش حجم محدود برای حل معادلات پیوستگی و مومنتم استفاده می کند.

معادلات حاکم

در مدل سازی پدیده آبستگي معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات حرکت سیالات و معادلات انتقال رسوب می باشند. کامل ترین فرم معادلات حرکت سیالات شامل معادله پیوستگی و مومنتم ناویر استوکس هستند که در نرم افزار Flow 3D این معادلات با استفاده از تقریب های تفاضل محدود و حجم محدود حل می شوند.

معادله پیوستگی

$$\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \varepsilon \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (1)$$

در معادله ۱، v_f نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان، ρ دانسیته سیال و R_{SOR} مرجع جرم است. U, V, W بردارهای سرعت در جهات x, y, z هستند. A_x, A_y, A_z برابر مساحت کسری محیط به جریان در جهت های x, y, z می باشند. ضریب R بسته به انتخاب سیستم مختصات، در مختصات کارتزین برابر ۱ و ε برابر صفر است. c^2 توان دوم سرعت موج و p فشار است.

معادله مومنتم

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + \varepsilon \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_x - \delta u_s) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \varepsilon \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial P}{\partial x} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \quad (4)$$

در معادلات ۲، ۳ و ۴، G_x, G_y, G_z و شتاب های بدنه، f_x, f_y, f_z شتاب های ناشی از لزجت، b_x, b_y, b_z افت جریان در محیط های دارای خلل و فرج و عبارت $(w - w_w - \delta w_s) \frac{R_{SOR}}{\rho V_F}$ مربوط به تزیق جرم در سرعت صفر است (سعادت و زین العابدینی، ۱۳۹۴).

معادلات انتقال رسوب

در این قسمت معادلات مورد استفاده در شبیه سازی فرسایش، انتقال و ته نشین شدن رسوبات در مدل Flow 3D معرفی می شود. در مدل Flow-3D، رسوبات به دو صورت می توانند وجود داشته باشند: رسوبات معلق و رسوبات متراکم. معادله انتقال هرگونه i ام از رسوبات معلق به صورت ۵ است:

$$\frac{\partial c_{s,i}}{\partial t} + \nabla \cdot (u c_{s,i}) = 0 \quad (5)$$

جریان تعریف شد (شکل ۲). مطابق مدل آزمایشگاهی، دبی مدل عددی ۰/۰۳۱ مترمکعب بر ثانیه، عمق جریان برابر با ۰/۱۵۳ متر، قطر رسوبات ۰/۰۰۴۳ متر و چگالی رسوبات ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد و در نهایت زمان مورد استفاده برای شبیه سازی ۱۸۰۰ ثانیه در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

کالیبراسیون مدل عددی

به منظور تعیین تعداد مش بهینه، شبیه سازی های مختلف با تعداد مش ۲۰۰۰۰، ۴۰۰۰۰، ۶۰۰۰۰، ۱۴۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰۰ و ۷۸۰۰۰۰ با یک بلوک مش برای پایه ی هم راستا با جریان انجام شد که با توجه به اینکه نتایج تعداد مش، ۷۸۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰۰ تفاوت چندانی باهم نداشت، به منظور صرفه جویی در وقت و هزینه، تعداد مش ۷۸۰۰۰۰ انتخاب گردید. همچنین شبیه سازی با تعداد بلوک مش های مختلف انجام شد که در نهایت ۳ بلوک مش نتایج قابل قبولی را ارائه داد، ابعاد و محدوده ی بلوک ها در جدول ۱ ارائه شده است.

در نهایت شبیه سازی هایی با مدل های تلاطم مختلف انجام شد که با ارزیابی خطاهای محاسباتی مربوط به شبیه سازی عمق آب شستگی (کمتر از ۲۰٪)، مدل RNG انتخاب گردید (مقدار عمق آب شستگی مدل آزمایشگاهی در مدل آزمایشگاهی بعد از ۱۵ دقیقه در حدود ۳/۳ سانتی متر و برای مدل های آشفتگی $k-\omega$ ، $k-\epsilon$ و RNG، به ترتیب ۱/۶، ۲ و ۲/۷ سانتی متر بود که مقدار خطای این مدل ها به ترتیب در حدود ۵۰٪، ۴۰٪ و ۱۸٪ است) که با نتایج سایر محققین نظیر محبوب و همکاران مطابقت داشت. در پدیده آبشستگی اطراف پایه و صفحات مستغرق، جریان های برشی وجود دارد و گردابه ها زیاد هستند که مدل RNG در شبیه سازی این نوع پدیده ها کاربرد دارد؛ بنابراین مدل بهینه، دارای سه بلوک مش، تعداد مش ۷۸۰۰۰۰ و مدل آشفتگی RNG بود. لازم به ذکر است که در تمامی شکل های ارائه شده در متن مقاله، جهت جریان از سمت چپ به راست می باشد. جدول ۲ خطای مدل سازی عددی مدل های مهم را نشان می دهد

تأثیر زاویه پایه بر روی عمق آبشستگی

همان طور که در شکل ۳ مشخص است برای پایه ی هم راستا با جریان حفره ی آبشستگی پس از ۳۰ دقیقه از شروع شبیه سازی، در قسمت جلوی پایه و طرفین پایه قابل مشاهده است که شکل آن متقارن و مقدار آبشستگی ۲/۵۵ سانتی متر می باشد. در قسمت پشت پایه تجمع رسوبات دیده می شود و مقدار آن حدود ۰/۶۵ سانتی متر است که در واقع رسوبات جایجا شده از قسمت جلو و طرفین پایه می باشد. با توجه به زاویه ی پایه با راستای جریان و الگوی جریان در اطراف، شکل حفره و ناحیه ی تجمع رسوبات متقارن می باشد.

به طوری که $C_{s,i}$ عبارت است از غلظت رسوب معلق، در واحد جرم بر حجم واحد، u عبارت است از سرعت متوسط مخلوط رسوب و سیال.

رسوبات متراکم در محل تعریف شده توسط کاربر هستند و در اثر تنش برشی جریان در بستر شروع به حرکت می کنند. می توان رابطه ی تعادل مومنتوم را برای هر ذره رسوب و مخلوط سیال و رسوب به صورت معادلات ۶ و ۷ نوشت:

$$\frac{\partial u_{s,i}}{\partial t} + u \cdot \nabla u_{s,i} = -\frac{1}{\rho_{s,i}} \nabla p + F - \frac{k_i}{f_{s,i} \rho_{s,i}} u_{r,i} \quad (6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + F \quad (7)$$

به طوری که $u_{s,i}$ عبارت است از سرعت گونه ی i ام ذرات رسوبی، $\rho_{s,i}$ دانسیته مواد رسوبی، $f_{s,i}$ جز حجمی گونه i ام ذرات رسوبی، P فشار، k تابع دراگ، F مجموع نیروی حجمی و نیروی لزجت و $u_{r,i}$ سرعت نسبی است.

برای شبیه سازی انتقال بار بستر در نرم افزار Flow 3D از مدل مولر^۱ استفاده شده است. این مدل، جریان حجمی رسوبات را در واحد عرض بر روی سطح بستر متراکم پیش بینی می کند (معادله ۸).

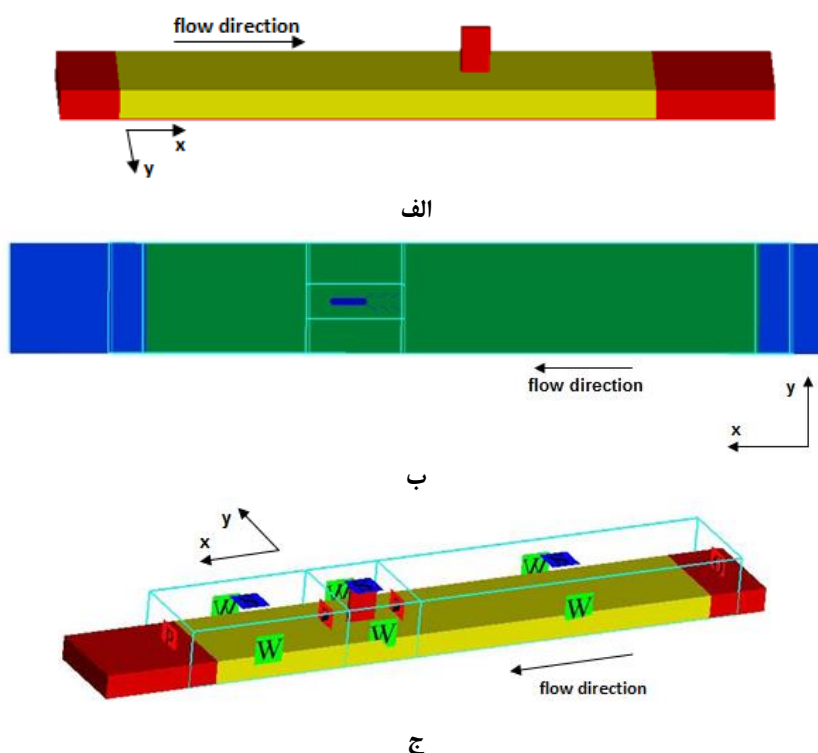
$$\Phi_i = \beta_i (\theta_i - \theta_{cr,i}^*)^{1.5} \quad (8)$$

به طوری که θ_i عدد شیلدز موضعی و $\theta_{cr,i}^*$ پارامتر شیلدز بحرانی و Φ_i عبارت است از شدت انتقال بار بستر بدون بعد که به نرخ حجمی انتقال بار بستر در واحد عرض بستگی دارد. مقدار β_i طبق پیشنهاد ون راین^۲ (۱۹۸۴)، برابر ۸ است (قاسم زاده، ۱۳۹۴).

مدل سازی

ابتدا تنظیمات مدل در حالت متریک قرار داده شد و هندسه مسئله مطابق مدل آزمایشگاهی ترسیم و مش بندی انجام گردید. شروط مرزی مدل عبارت اند از: ورودی شرط مرزی Volume flow rate (با توجه به مشخص بودن دبی جریان)، دیواره ی جانبی و کف Wall (دیواره ها و کف از جنس صلب هستند)، مرز بین بلوک ها و بالای فلووم Symmetry (این شرط مرزی شرایط بیرون شبکه را مشابه با شرایط روی مرز داخلی شبکه در نظر می گیرد که از جمله کاربردهای آن در روی سطح آزاد و بین بلوک متصل به هم است) و مرز خروجی Specified pressure (با توجه به اینکه عمق مشخص و ثابت بود در نتیجه مرز خروجی فشار در نظر گرفته شده که عمق

1- Meyer-Peter-Muller
2- Van Rijn



شکل ۲ - مدل عددی، الف: نمای جانبی، ب: نمای بالا، ج: شرایط مرزی

جدول ۱- موقعیت و مشخصات بلوک‌های مش

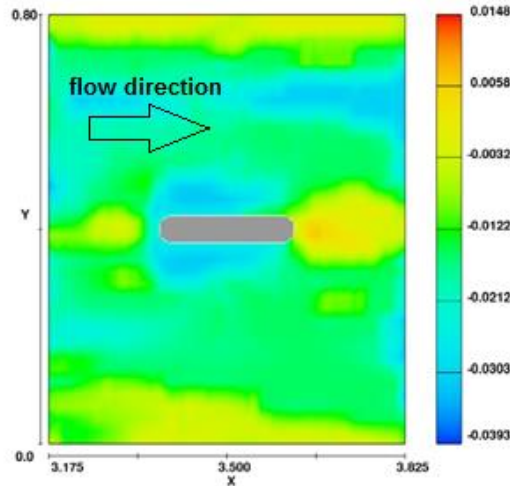
توضیحات	تعداد مش	موقعیت انتهایی (m)	موقعیت ابتدایی (m)	بلوک مش
کل بلوک به صورت یکجا مش بندی شده است	۹۰۰۰۰	۳/۱۷۵	۰/۲۵	بلوک ۱
تعداد مش در راستای x، y و z به ترتیب ۱۲۰، ۱۰۰ و ۵۰ بود	۶۰۰۰۰	۳/۸۲۵	۳/۱۷۵	بلوک ۲
کل بلوک به صورت یکجا مش بندی شده است	۹۰۰۰۰	۵/۲۵	۳/۸۲۵	بلوک ۳

جدول ۲- خطای شبیه‌سازی عددی عمق آب نشستگی بعد از ۱۵ دقیقه

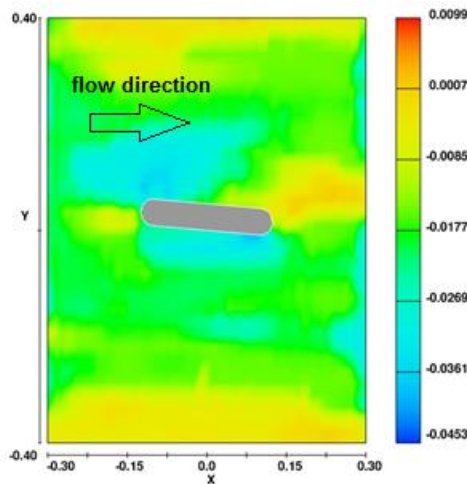
عنوان مدل	عمق آب نشستگی مدل آزمایشگاهی (cm)	عمق آب نشستگی مدل عددی (cm)	خطا (%)
P ₀	۳/۳	۲/۷	۱۸/۲
P ₅	۳/۸	۳/۲	۱۵/۸۰
P ₁₀	۴/۹	۴	۱۸/۴
P ₀ V _{30,1,25}	۰/۴	۰/۳۴	۱۵
P ₀ V _{30,2,5}	۱/۲	۱	۱۶/۷
P ₅ V _{30,2,5}	۱/۵	۱/۲۴	۱۷/۳
P ₁₀ V _{30,2,5}	۲/۲	۱/۹	۱۳/۶

۵ درجه در جلوی پایه، ۳/۶ سانتیمتر بود؛ اما در سمت کم‌فشار، توسعه‌ی حفره تا بخش میانی پایه قابل‌رؤیت است و بیشترین عمق در ناحیه‌ای نزدیک نوک پایه قابل‌مشاهده است. مقدار رسوب تجمع یافته در پشت پایه و همچنین در قسمت میانی پایه، حدود ۰/۰۳ سانتی‌متر بود (شکل ۴).

با زاویه‌دار شدن پایه، الگوی جریان در اطراف پایه تغییر کرده، در نتیجه ناحیه‌ی آب‌نشستگی شکل متقارنی نخواهد داشت. یک سمت پایه که در تماس مستقیم با جریان است، ناحیه پرفشار و در سمت دیگر آن ناحیه کم‌فشار می‌باشد. توسعه‌ی حفره در سمت پرفشار در طول پایه دیده شده و مقدار آن پس از گذشت ۳۰ دقیقه برای پایه‌ی



شکل ۳- تغییرات حفره‌ی آبستگی در اطراف پایه هم‌راستا با جریان بعد از ۱۸۰۰ ثانیه (ابعاد و مقادیر برحسب متر هستند)



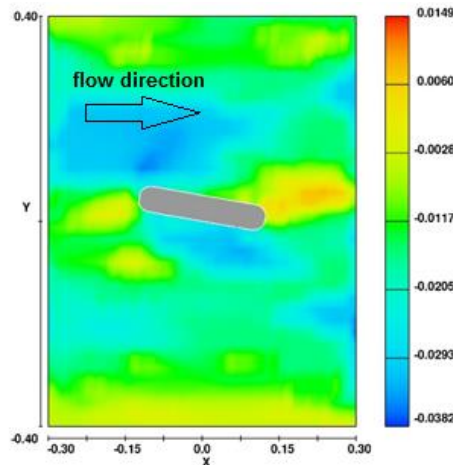
شکل ۴- تغییرات حفره‌ی آبستگی در اطراف پایه با زاویه ۵ درجه با جریان بعد از ۱۸۰۰ ثانیه (ابعاد و مقادیر برحسب متر هستند)

شده از این مناطق یا در فضای بین صفحات مستغرق جلوی پایه جمع شده، به تدریج شسته شده و به پایین دست منتقل می‌شوند و یا مستقیماً توسط جریان به پایین دست منتقل می‌شوند. جمع شدن رسوبات در فضای بین صفحات مستغرق نزدیک پایه باعث می‌شود فرایند آبستگی در جلو پایه کند شده و بدین ترتیب بتوان فرایند آبستگی را کنترل کرد (شکل ۶). پارامترهای مختلفی بر روی عملکرد کنترلی صفحات تأثیر می‌گذارند که تغییر هر یک از این پارامترها به نحوی بر روی مکانیسم کنترلی آن‌ها تأثیر گذاشته، نحوه‌ی جابجایی و انتقال رسوبات را در اطراف پایه تحت تأثیر قرار می‌دهند. از جمله این پارامترها می‌توان به تعداد صفحات، ارتفاع صفحات، زاویه‌ی صفحات با امتداد جریان و ... اشاره کرد.

با افزایش پایه از ۵ به ۱۰ درجه، توسعه‌ی حفره به لحاظ وسعت و مقدار عمق آن در طرفین پایه افزایش یافت و پس از گذشت ۳۰ دقیقه، مقدار آن ۴ سانتی‌متر شد. همچنین شدت گرداب‌ها در قسمت پشت پایه افزایش یافته که نتیجه‌ی آن کاهش وسعت ناحیه تجمع رسوب و شستشوی رسوبات از انتهای پایه است که ارتفاع تجمع رسوب در قسمت پشت پایه حدود ۰/۲۲ سانتی‌متر بود. برای پایه با زاویه‌ی ۱۰ درجه، عدم تقارن حفره آبستگی واضح‌تر می‌باشد (شکل ۵).

پایه با صفحات مستغرق

در شبیه‌سازی با صفحات مستغرق اصولاً فرایند آبستگی از ابتدای صفحات شروع شده و حفره‌ی کوچکی در ابتدای آن‌ها تشکیل می‌شود که با گذشت زمان این حفره بزرگ می‌شود. رسوبات جابجا



شکل ۵- تغییرات حفره‌ی آبشستگی در اطراف پایه با زاویه ۱۰ درجه با جریان بعد از ۱۸۰۰ ثانیه (ابعاد و مقادیر برحسب متر هستند)



شکل ۶- انتقال رسوب در مدل آزمایشگاهی پایه همراه با صفحات مستغرق

افزایش ارتفاع صفحات، اندازه مؤثر آن‌ها در مقابل جریان افزایش می‌یابد که نتیجه‌ی آن افزایش نوسانات در قسمت جلوی پایه و قسمت پشت آن بود. البته با توجه به مستغرق بودن صفحات و ارتفاع کم آن‌ها در مقایسه با عمق جریان، تفاوت آن‌ها باهم بسیار کم و ناچیز است.

تأثیر زاویه صفحات بر روی پروفیل طولی سطح آب

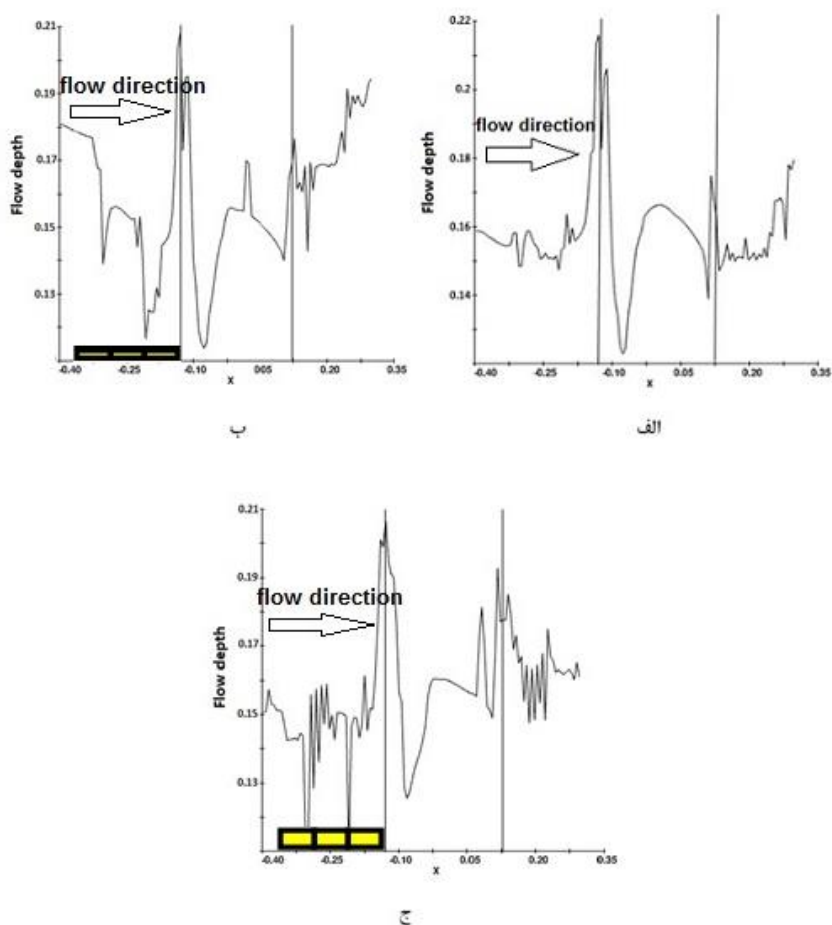
مطابق شکل ۸ دو مدل در شرایط یکسان، پایه ۵ درجه و ارتفاع صفحات مستغرق ۲/۵ سانتیمتر با زاویه‌های ۲۰ و ۳۰ درجه مورد مقایسه قرار گرفته است. بررسی نتایج نشان داد، هرچه زاویه‌ی صفحات بیشتر باشد، میزان تلاطم شدیدتر بوده و نوسانات سطح آب بیشتر است. در این حالت نیز با توجه به اینکه ارتفاع صفحات در مقایسه با عمق جریان کم است، نتایج مربوط به زوایای مختلف تفاوت زیادی با یکدیگر ندارد.

تأثیر زاویه پایه بر روی پروفیل سطح آب

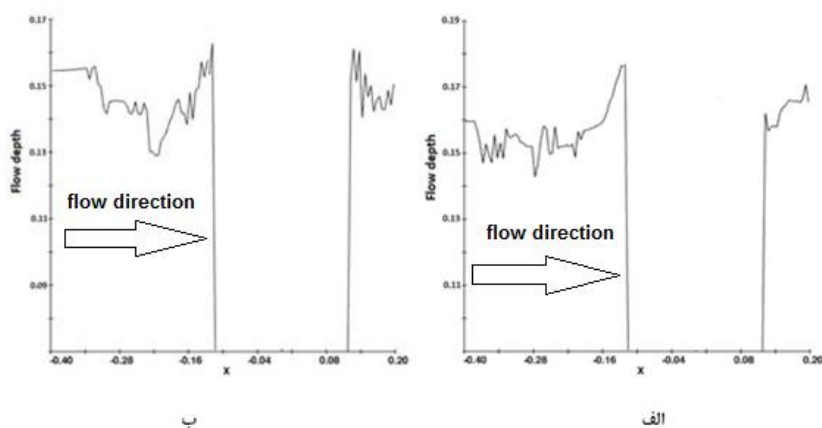
برای این منظور، تغییرات پروفیل طولی سطح آب در بلوک ۲ مورد بررسی قرار گرفت. برای پایه هم‌راستا با جریان میزان نوسانات سطح آب قبل از پایه در طول پایه و بعد از آن دارای حداقل مقدار است، اما با زاویه‌دار شدن پایه با توجه به اینکه عرض مؤثر پایه در مقابل جریان افزایش می‌یابد، بر میزان تلاطم و نوسانات سطح آب افزوده شد که این تلاطم‌ها و نوسانات برای پایه ۱۰ درجه به حداکثر مقدار خود رسید. در شرایطی که صفحات مستغرق در جلوی پایه قرار می‌گیرد، صفحات مانند یک مانع در مقابل جریان عمل کرده و نوسانات ناشی از برخورد جریان و انحراف آن در مقایسه با پایه‌ی بدون حمایت، در قسمت جلوی پایه و بعد از آن افزایش خواهد یافت.

تأثیر ارتفاع صفحات بر روی پروفیل طولی سطح آب

همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، در یک شرایط ثابت، با



شکل ۷- پروفیل طولی سطح آب پایه هم‌راستا با جریان و زاویه صفحات ۳۰. الف: ارتفاع صفحات هم‌تراز با بستر. ب: ارتفاع صفحات ۱/۲۵ سانتی‌متر روی بستر. ج: ارتفاع صفحات ۲/۵ سانتی‌متر روی بستر (ابعاد و مقادیر برحسب متر هستند)



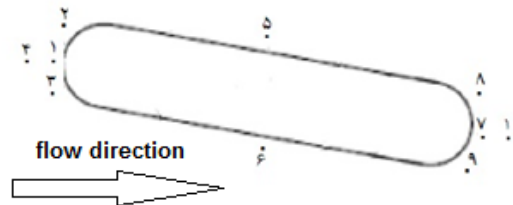
شکل ۸- پروفیل طولی سطح آب پایه ۵ درجه ارتفاع صفحات ۲/۵ سانتی‌متر. الف: زاویه صفحات ۲۰ درجه. ب: زاویه صفحات ۳۰ درجه (ابعاد و مقادیر برحسب متر هستند)

ارزیابی پارامترهایی است که اندازه‌گیری آن‌ها در مدل‌های آزمایشگاهی بسیار مشکل و همراه با خطا و یا عمل غیرممکن است،

تأثیر زاویه پایه بر روی تنش برشی همان‌طور که قبلاً اشاره شده، از قابلیت‌های مدل‌های عددی

(شکل ۹)، مقادیر تنش برشی در این نقاط استخراج گردید و در حالت‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفت.

از آن جمله می‌توان به تنش برشی اشاره کرد که پارامتری تأثیرگذار در فرایند آبشستگی است. به‌منظور بررسی تنش برشی و اثرات آن بر روی عمق آبشستگی، یکسری نقاط مهم در اطراف پایه مشخص شد



شکل ۹- نقاط اندازه‌گیری تنش در اطراف پایه

زاویه‌دار، تنش برشی به‌شدت کاهش یافت به‌طوری‌که مقدار آن برای پایه‌ی صفر، ۵ و ۱۰ درجه به ترتیب در حدود ۰/۴۷، ۰/۰۹ و ۰/۰۷۹ نیوتون بر مترمربع بود. زاویه‌دار شدن پایه منجر به تشکیل ناحیه‌ی کم‌فشار در انتهای آن خواهد شد که می‌توان آن را با توجه به مقادیر عددی تنش استنباط کرد. وجود این ناحیه کم‌فشار سبب تجمع رسوبات در این ناحیه شد.

مطابق نتایج عددی ارائه‌شده در جدول ۳، با زاویه‌دار شدن پایه در قسمت جلو آن (نقطه ۱) مقدار تنش برشی افزایش یافت برای پایه ۱۰ درجه بیشترین مقدار و در حدود ۰/۵۵ نیوتن بر مترمربع به دست آمد. همچنین در دیواره‌ی مقابل جریان (نقطه ۶) با توجه به برخورد مستقیم جریان با آن، تنش برشی افزایش یافت که برای پایه‌ی ۱۰ درجه نسبت به پایه‌ی صفر درجه، ۱۰٪ بیشتر بود. در انتهای پایه (نقطه ۷) به دلیل کاهش قدرت جریان‌های چرخشی در پایه‌های

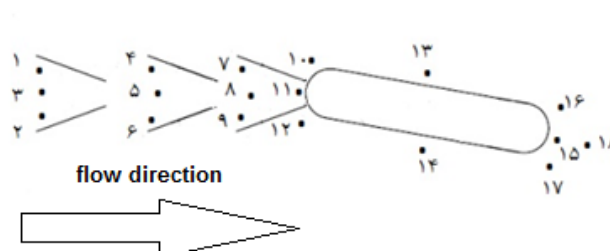
جدول ۳- مقادیر تنش برشی (τ_0 (N/m²)) برای پایه با زاویه صفر، پنج و ده درجه و در موقعیت‌های مختلف

P ₁₀	P ₅	P ₀	موقعیت نقاط	P ₁₀	P ₅	P ₀	موقعیت نقاط
۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۵	۶	۰/۵۵	۰/۴۲	۰/۴	۱
۰/۰۷۹	۰/۰۹	۰/۴۷	۷	۰/۶۶	۰/۶	۰/۵۱	۲
۰/۰۰۷	۰/۰۰۹	۰/۴۶	۸	۰/۳۶	۰/۴۲	۰/۵۲	۳
۰/۰۸۳	۰/۰۹۹	۰/۴۸	۹	۰/۳۱	۰/۴۱	۰/۸	۴
۰/۲۲	۰/۳۵	۰/۳۱	۱۰	۰/۴	۰/۴۶	۰/۴۲	۵

پایه و صفحات مستغرق در نظر گرفته شد. شکل ۱۰ این موقعیت‌ها را نشان می‌دهد.

تأثیر صفحات مستغرق بر روی تنش برشی

به‌منظور ارزیابی تأثیر صفحات مستغرق بر روی تنش برشی، در حالت پایه همراه با صفحات مستغرق موقعیت‌های مختلفی در اطراف



شکل ۱۰- نقاط اندازه‌گیری تنش برشی اطراف پایه همراه با صفحات مستغرق

این حالت نقش کنترلی صفحات مستغرق به حداقل خواهد رسید. همچنین مقدار تنش در نقاط ۱۱، ۱۵ و ۱۸ حداقل می باشد که نقطه ۱۱ در جلوی پایه و ۱۵ و ۱۸ در پشت پایه قرار دارند که در مقایسه با پایه‌ی بدون حمایت، در جلوی پایه مقدار تنش را در حدود ۹۹٪ و در پشت پایه برای دونقطه‌ی ۱۵ و ۱۸ به ترتیب ۹۸٪ و ۹۷٪ کاهش داد.

تأثیر ارتفاع صفحات بر روی مقادیر تنش برشی
مطابق نتایج عددی ارائه شده در جدول ۴، هرچه ارتفاع صفحات مستغرق کمتر باشد، در جلوی پایه، به دلیل گردابه‌های شدید و همچنین شدت بالای تلاطم، تنش برشی افزایش پیدا می کند که این امر باعث شسته شدن رسوبات و جابجایی و انتقال آن‌ها می شود، در

جدول ۴- مقادیر تنش برشی ($\tau_0(N/m^2)$) برای پایه با زاویه صفر و ارتفاع صفحات مختلف

موقعیت نقاط	$P_0V_{30.0}$	$P_0V_{30.1.25}$	$P_0V_{30.2.5}$	موقعیت نقاط	$P_0V_{30.0}$	$P_0V_{30.1.25}$	$P_0V_{30.2.5}$
۱	۰/۴۸	۰/۴۳	۰/۳۸	۱۰	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۱۴
۲	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۱۰	۱۱	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۱
۳	۰/۴۹	۰/۵۵	۰/۳۹	۱۲	۰/۲۵	۰/۳۲	۰/۱۰
۴	۰/۲۷	۰/۳۰	۰/۲۲	۱۳	۰/۴	۰/۵۲	۰/۳۴
۵	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۲۰	۱۴	۰/۳۱	۰/۴۰	۰/۳۸
۶	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۲۰	۱۵	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۴
۷	۰/۰۶۸	۰/۰۵۰	۰/۰۳	۱۶	۰/۰۵۵	۰/۰۴۰	۰/۰۰۵
۸	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۲۵	۱۷	۰/۴۶	۰/۵۳	۰/۴
۹	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۲۶	۱۸	۰/۰۰۹	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۳

۹۸٪ کاهش یافت. کاربرد صفحات نیز سبب حفاظت از دیواره سمت پرفشار پایه شد به طوری که برای پایه ۵ درجه مقدار تنش در نقطه ۱۲ در حدود ۴۶٪ کاهش یافت و برای پایه ۱۰ درجه در نقطه ۱۲، ۶۳٪ کاهش یافت (جدول ۵). می توان نتیجه گرفت که با زاویه دار شدن پایه از نقش حمایتی صفحات در کنترل تنش برشی کاسته شده است.

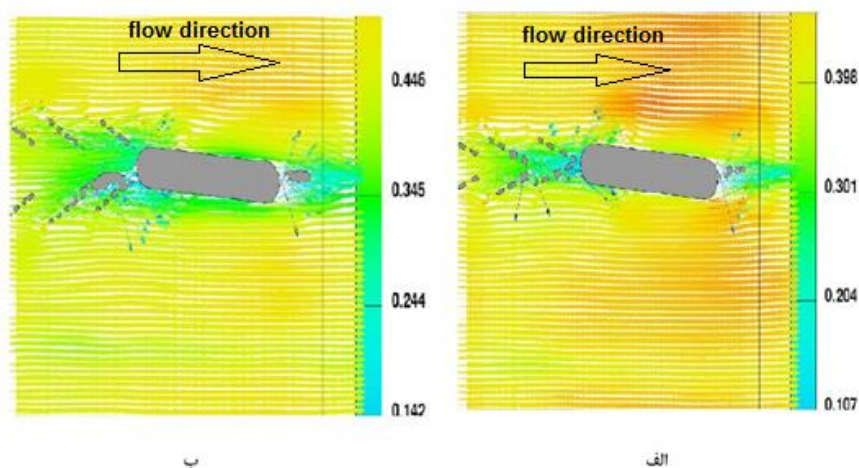
تأثیر زاویه صفحات مستغرق بر روی مقادیر تنش برشی
مطابق نتایج عددی، هرچه زاویه صفحات مستغرق بیشتر شود، به دلیل پدید آمدن جریان چرخشی ضعیف و گردابه‌های ضعیف تر، مقدار تنش برشی کاهش یافت. مقایسه نتایج در این حالت با پایه‌ی بدون حمایت نشان می دهد که در این حالت تنش در قسمت جلوی پایه در حدود ۴۷٪ و در قسمت پشت پایه در نقاط ۱۵ و ۱۸ به ترتیب ۹۴٪ و

جدول ۵- مقادیر تنش برشی ($\tau_0(N/m^2)$) برای پایه ۵ درجه و صفحات مستغرق با زاویه متفاوت

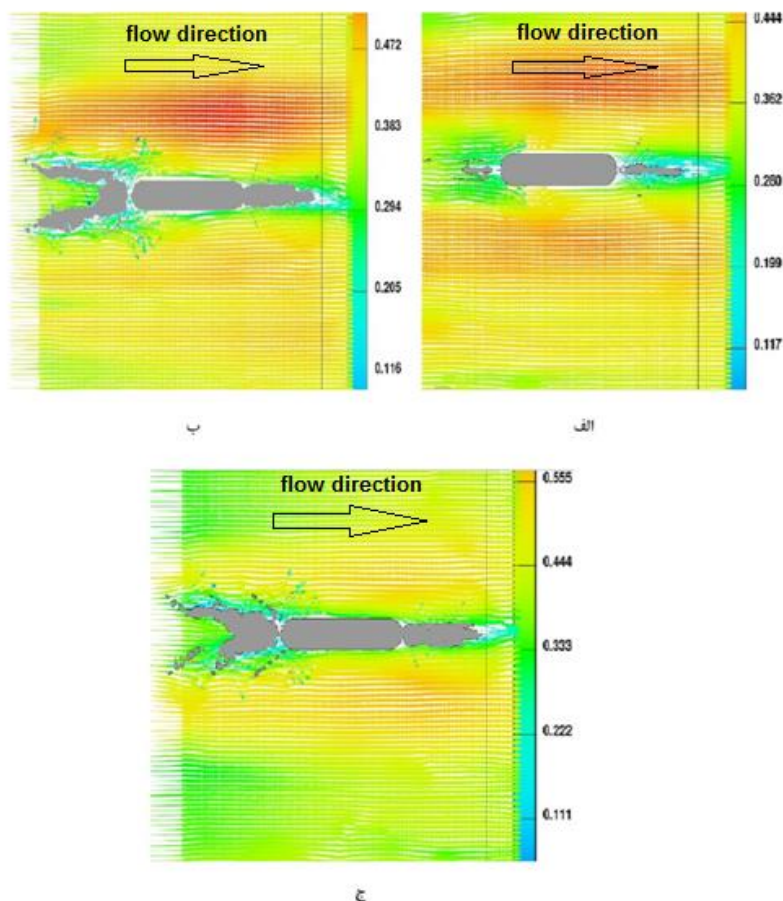
موقعیت نقاط	$P_5V_{30.0}$	$P_5V_{20.0}$	موقعیت نقاط	$P_5V_{30.0}$	$P_5V_{20.0}$	موقعیت نقاط	$P_5V_{30.0}$	$P_5V_{20.0}$
۱	۰/۴۳	۰/۶	۷	۰/۰۲	۰/۰۱	۱۳	۰/۷۵	۰/۵۰
۲	۰/۴	۰/۵۵	۸	۰/۰۴	۰/۰۱۵	۱۴	۰/۸۰	۰/۶۲
۳	۰/۴۵	۰/۶۱	۹	۰/۰۳۳	۰/۰۰۹	۱۵	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸
۴	۰/۲	۰/۳	۱۰	۰/۲۴	۰/۳۰	۱۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
۵	۰/۲۵	۰/۲۸	۱۱	۰/۱۸	۰/۲۲	۱۷	۰/۵۱	۰/۴۳
۶	۰/۲۳	۰/۲۵	۱۲	۰/۲۰	۰/۲۸	۱۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵

کاهش عمق آبستگي را به دنبال خواهد داشت. از طرفی با افزایش زاویه قرارگیری صفحات، میزان تلاطم جریان و قدرت گرداب نعل اسبی را در قسمت جلوی پایه خواهد کاست، نتیجه‌ی آن تغییرات کمتر عمق آبستگي اطراف پایه می باشد. بررسی شکل‌ها نشان می دهد که با افزایش زاویه صفحات ناحیه وسیع تری تحت تأثیر قرار می گیرد، البته حفاظت از دیواره‌های پایه بهتر صورت می گیرد.

الگوی جریان
تأثیر زاویه صفحات بر الگوی جریان
مطابق شکل ۱۱ در شرایطی که زاویه صفحات ۳۰ درجه می باشد، الگوی جریان در ناحیه وسیع تری تحت تأثیر قرار گرفت که نتیجه‌ی آن جابجایی رسوبات بیشتر است. بخشی از این رسوبات جابجا شده از اطراف صفحات به قسمت میانی صفحات منتقل شده، در این ناحیه تجمع رسوبات اتفاق می افتد که در یک بازه‌ی زمانی



شکل ۱۱- الگوی جریان در اطراف پایه ۵ درجه با ارتفاع صفحات ۲/۵ سانتی متر. الف: زاویه صفحات ۲۰ درجه. ب: زاویه صفحات ۳۰ درجه (مقادیر بر حسب متر بر ثانیه هستند)



شکل ۱۲- الگوی جریان مدل پایه همراستا با جریان و زاویه صفحات ۳۰ درجه. الف: صفحات هم تراز با بستر. ب: ارتفاع صفحات ۱/۲۵ سانتی - متر. ج: ارتفاع صفحات ۲/۵ سانتی متر (مقادیر بر حسب متر بر ثانیه هستند)

رسوبات در ناحیه جلوی پایه بیشتر خواهد بود که این اتفاق سبب کنترل بهتر عمق آبشستگی در جلوی پایه خواهد شد. همچنین در زاویه‌ی صفحات ۳۰ درجه تغییرات عمق آبشستگی در طرفین پایه نسبت به زاویه‌ی ۲۰ درجه کمتر است. علت آن را می‌توان طول مؤثر بیشتر صفحات در زاویه‌ی ۳۰ درجه دانست که کنترل عمق آبشستگی را در طرفین پایه به همراه دارد. در قسمت انتهایی پایه نیز در بخش کم‌فشار، تجمع رسوبات در زاویه‌ی ۳۰ درجه نسبت به ۲۰ درجه بیشتر است.

تأثیر ارتفاع صفحات بر روی پروفیل بستر

با افزایش ارتفاع صفحات تجمع رسوبات در جلوی پایه بیشتر و عمق آبشستگی کمتر خواهد بود. همچنین افزایش ارتفاع صفحات سبب کنترل عمق آبشستگی در طرفین و انتهایی پایه گردید. جابجایی رسوبات از قسمت بالادست به طرفین و نقش حفاظتی صفحات سبب کنترل عمق آبشستگی در طرفین و انتهایی پایه شده است. این نتایج با توجه به مقادیر تراز بستر در اطراف پایه از روی شکل ۱۴ قابل استنباط است.

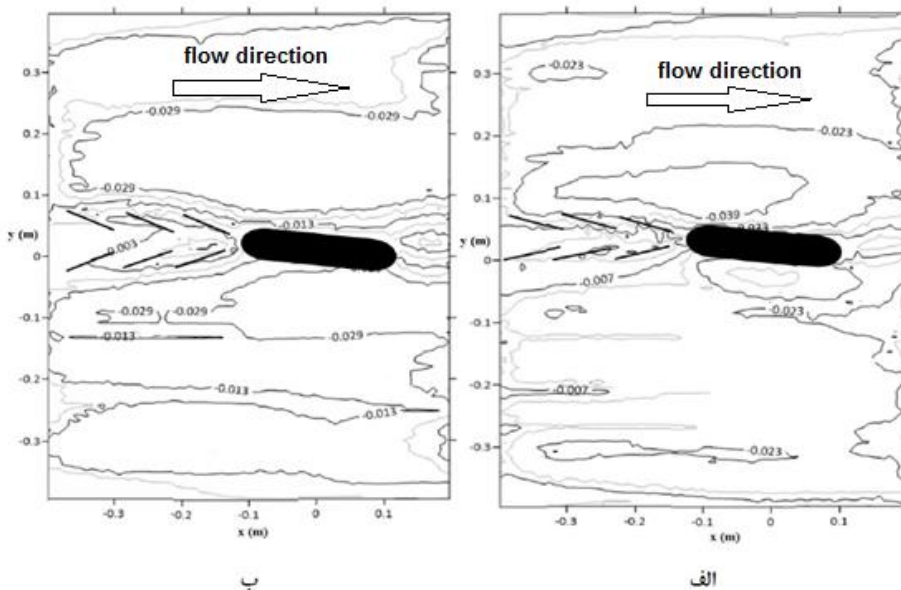
تأثیر ارتفاع صفحات بر الگوی جریان

با افزایش ارتفاع صفحات، میزان نگهداشت رسوبات در قسمت جلوی پایه افزایش یافت. در واقع افزایش ارتفاع صفحات، مانعی بلندتر در مقابل حرکت رسوبات ایجاد می‌کند که علاوه بر کنترل رسوبات سبب کاهش قدرت گرداب‌ها در جلوی پایه خواهد شد (شکل ۱۲). بر اساس نتایج مدل عددی، عمق آبشستگی در جلوی پایه هم‌راستا با جریان و صفحات با زاویه ۳۰ درجه، هم‌تراز با بستر، با ارتفاع ۱/۲۵ سانتیمتر و با ارتفاع ۲/۵ سانتی‌متر، بعد از ۳۰ دقیقه به ترتیب ۳/۱، ۰/۳۵ و ۰/۰۰۵+ (روی بستر) سانتی‌متر بود. همچنین عمق آبشستگی در دیواره‌ی کناری برای صفحات هم‌تراز، ۱/۲۵ و ۲/۵ سانتی‌متر به ترتیب برابر ۰/۰۱۴، ۰/۰۰۹ و ۰/۰۰۷ سانتی‌متر به دست آمد.

پروفیل بستر

تأثیر زاویه صفحات بر روی پروفیل بستر

در شکل ۱۳، تغییرات تراز بستر در ناحیه اطراف پایه ۵ درجه با ارتفاع صفحات ۲/۵ سانتیمتر و ۲۰ زاویه‌ی ۳۰ درجه نشان داده شده است. مطابق شکل، هرچه زاویه صفحات بیشتر باشد، تجمع



شکل ۱۳- تغییرات تراز بستر مدل زاویه پایه ۵ درجه، ارتفاع صفحات ۲/۵ سانتی‌متر. الف: زاویه صفحات ۲۰ درجه. ب: زاویه صفحات ۳۰ درجه (ابعاد و مقادیر برحسب متر هستند)

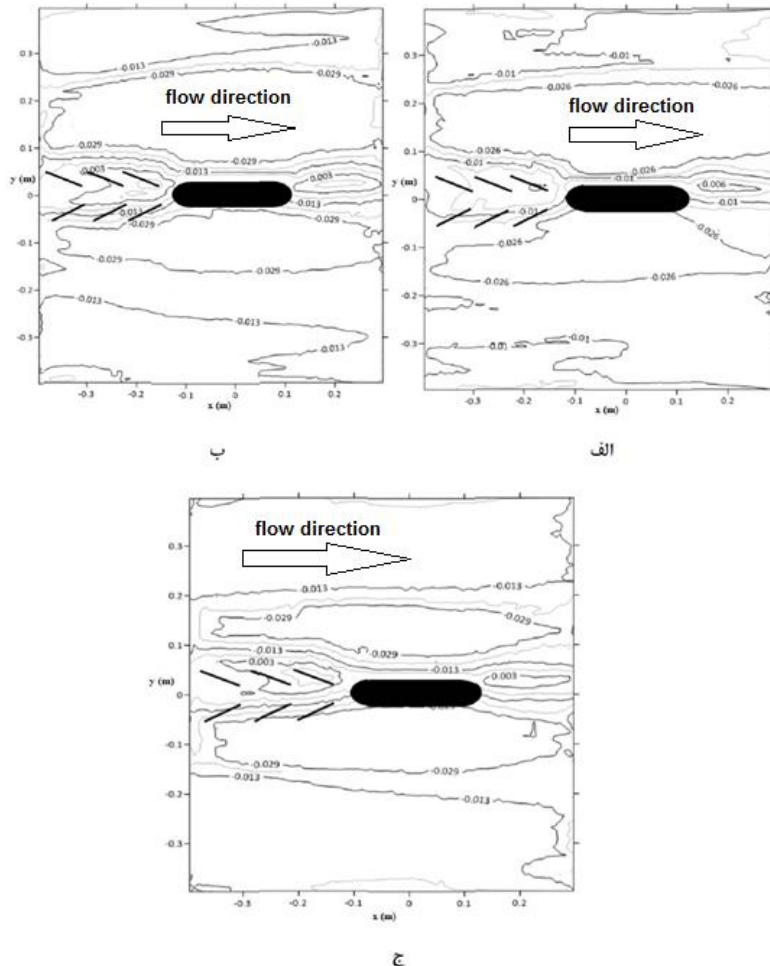
که با افزایش زاویه‌ی پایه با امتداد جریان از عملکرد زاویه‌ی صفحات با امتداد جریان کاسته می‌شود. در مورد پایه‌های زاویه‌دار باید به آن اشاره کرد که وجود صفحات در جلو پایه سبب حفاظت از دیواره‌های پایه که در تماس مستقیم با جریان است (سمت پرفشار)، شده و نرخ

تأثیر زاویه‌ی پایه بر روی عملکرد صفحات مستغرق

با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، با افزایش زاویه‌ی پایه بر شدت جریان‌های گردابی در اطراف پایه افزوده شده و در نتیجه آبشستگی در اطراف پایه تشدید می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد

انحراف (سمت کم فشار) پایه قرار دارند نسبت به صفحات سمت مقابل (پرفشار) بیشتر می باشد.

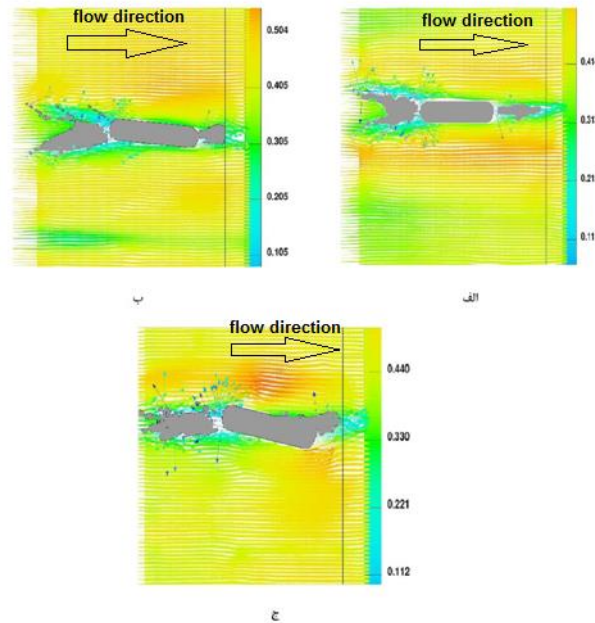
توسعه ی آبستنگی و عمق حفره ی آبستنگی را در سمت این دیواره کاهش می دهد. در مورد آبستنگی در اطراف صفحات در پایه های زاویه دار نیز باید گفت که آبستنگی در اطراف صفحاتی که در سمت



شکل ۱۴- پروفیل بستر در مدل زاویه پایه هم راستا با جریان و زاویه صفحات ۳۰ درجه. الف: صفحات هم تراز با بستر. ب: ارتفاع صفحات ۱/۲۵ سانتی متر. ج: ارتفاع صفحات ۲/۵ سانتی متر (ابعاد و مقادیر بر حسب متر هستند)

مستغرق در مسیر جریان، تجمع رسوبات بیشتر اتفاق می افتد. بر اساس نتایج مدل عددی، برای پایه با زوایای مختلف، با افزایش ارتفاع صفحات مستغرق عملکرد، آن ها در انتقال رسوب و همچنین کنترل رسوبات در قسمت جلو پایه افزایش یافت. افزایش زاویه صفحات مستغرق نیز از ۲۰ درجه به ۳۰ درجه، با توجه به اینکه طول مؤثر آن ها را در برابر جریان افزایش می دهد، افزایش راندمان صفحات مستغرق را در جابجایی و کنترل رسوبات به دنبال دارد؛ بنابراین بهترین آرایش صفحات مستغرق را می توان، صفحات با ارتفاع ۲/۵ سانتیمتر روی بستر و با زاویه ۳۰ درجه با راستای جریان دانست.

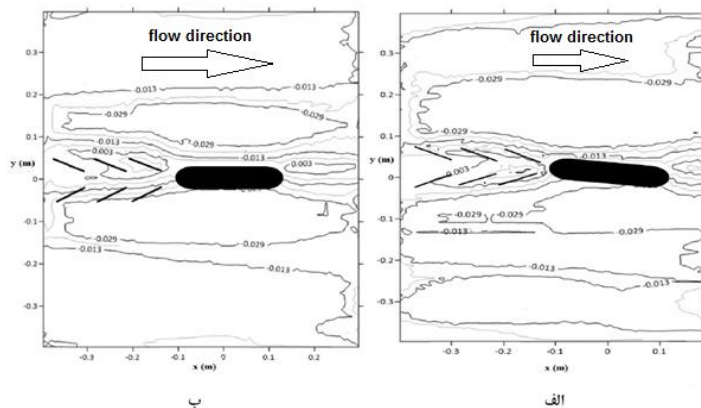
تأثیر زاویه پایه در بهترین مدل صفحات بر روی الگوی جریان
همان طور که در شکل ۱۵ مشخص است، با زاویه دار شدن پایه، الگوی جریان در محدوده ی عرضی بیشتری تحت تأثیر قرار می گیرد. همچنین الگوی جابجایی رسوبات و تجمع آن ها در ناحیه ی بین صفحات متفاوت خواهد بود. برای پایه هم راستا با جریان، الگوی تجمع رسوبات شکل متقارن دارد. در حالی که با زاویه دار شدن پایه تجمع رسوبات در سمت مرکز کانال بیشتر است، چرا که در این ناحیه سرعت جریان بیشتر بوده، چرخش جریان شدیدتر، گرداب ها قوی تر و جابجایی رسوب بیشتر است. در نتیجه به واسطه وجود صفحات



شکل ۱۵- الگوی جریان مدل زاویه صفحات ۳۰ درجه و ارتفاع ۲/۵ سانتی متر. الف: پایه هم‌راستا با جریان. ب: زاویه پایه ۵ درجه. ج: زاویه پایه ۱۰ درجه (ابعاد و مقادیر برحسب متر هستند)

پرفشار پایه کاهش یافت که این تغییرات در شکل مشخص است اما در سمت دیواره‌ی کم‌فشار، عمق آبشستگی نسبت به پایه‌ی بدون زاویه کمتر بود. دلیل آن را می‌توان نقش حمایتی صفحات مستغرق و تنش برشی کمتر بستر در این ناحیه دانست.

تأثیر زاویه پایه در بهترین مدل صفحات بر روی پروفیل بستر مطابق شکل ۱۶، در بهترین مدل صفحات، با زاویه‌دار شدن پایه موقعیت قرارگیری صفحات در جلوی پایه تغییر کرده، در نتیجه ناحیه تجمع رسوبات جابجا خواهد شد. با زاویه‌دار شدن پایه عملکرد صفحات در کنترل آبشستگی در قسمت جلوی پایه و در سمت دیوار

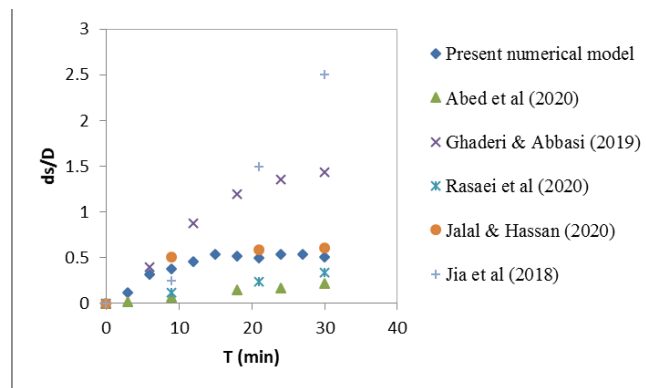


شکل ۱۶- پروفیل بستر مدل زاویه صفحات ۳۰ درجه با ارتفاع ۲/۵ سانتی متر. الف: زاویه پایه ۵ درجه. ب: پایه هم‌راستا با جریان (ابعاد و مقادیر برحسب متر هستند)

دهد که نتایج مدل عددی تحقیق حاضر بیشترین مطابقت را با نتایج جلال و حسن (Jalal and Hasan, 2020) دارد. در مدل جلال و حسن پایه استوانه‌ای بوده و قطر آن تقریباً ۵/۰۸ سانتیمتر، عمق

مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج سایر محققین در این قسمت نتایج بی‌بعد توسعه زمانی عمق آبشستگی در ۳۰ دقیقه با نتایج سایر محققین مقایسه شد. بررسی شکل ۱۷ نشان می-

علت این امر را می‌توان در متفاوت بودن شرایط جریان و مدل‌ها دانست. بیشترین تفاوت مربوط به مدل جیا و همکاران (Jia et al., 2018) بود که علت آن دبی زیاد جریان (۵۸/۵ لیتر بر ثانیه)، قطر زیاد پایه (۲۰ سانتیمتر) می‌باشد. در مدل‌هایی که مقادیر عمق آبستگی بی‌بعد کمتر می‌باشد نظیر مدل رسایی و همکاران (Rasaei et al., 2020) می‌توان به رسوبات درشت‌دانه تر (۱ میلی‌متر) و دبی جریان کمتر (۱۱/۲ لیتر بر ثانیه) اشاره کرد. در این مدل عمق بی‌بعد آبستگی بعد از ۳۰ دقیقه ۰/۳۴ بود.



شکل ۱۷ - مقایسه نتایج بی‌بعد عمق آبستگی با نتایج سایر محققین (T زمان، ds عمق آبستگی و D عرض پایه می‌باشد)

تنش را در حدود ۹۹٪ و در پشت پایه در حدود ۹۷٪ کاهش داد. با افزایش زاویه صفحات، الگوی جریان در ناحیه وسیع‌تری تحت تأثیر قرار گرفت که نتیجه‌ی آن جابجایی رسوبات بیشتر است. با افزایش ارتفاع صفحات، میزان نگهداشت رسوبات در قسمت جلوی پایه افزایش یافت. هرچه ارتفاع صفحات مستغرق کمتر باشد، در جلوی پایه، به دلیل گردابه‌های شدید و همچنین شدت بالای تلاطم، تنش برشی افزایش پیدا می‌کند که این امر باعث شسته شدن رسوبات و جابجایی و انتقال آن‌ها می‌شود، در این حالت نقش کنترلی صفحات مستغرق به حداقل خواهد رسید. مطابق نتایج، عمق آبستگی در جلوی پایه هم‌راستا با جریان و صفحات با زاویه ۳۰ درجه، هم‌تراز با بستر، با ارتفاع ۱/۲۵ سانتیمتر و با ارتفاع ۲/۵ سانتیمتر، بعد از ۳۰ دقیقه به ترتیب ۳/۱، ۰/۳۵ و ۰/۰۵+ (روی بستر) سانتیمتر بود. در بهترین مدل صفحات، با زاویه‌دار شدن پایه موقعیت قرارگیری صفحات در جلوی پایه تغییر کرده، در نتیجه ناحیه تجمع رسوبات جابجا خواهد شد. بر اساس نتایج تحقیق حاضر، مطالعه دقیق الگوی جریان در اطراف پایه‌های زاویه‌دار سبب شناسایی نقاط بحرانی در اطراف پایه شده و در اجرای دقیق اقدامات حمایتی و کنترلی نظیر نصب صفحات مستغرق و یا اجرای سنگ‌چین با ضخامت متفاوت در اطراف پایه مؤثر است.

جریان ۱۵ سانتیمتر و قطر رسوبات ۰/۳۸۵ میلی‌متر بود که این مقادیر نزدیک به تحقیق حاضر بود (قطر پایه ۵ سانتیمتر، عمق جریان ۱۵/۳ سانتیمتر و قطر رسوبات ۰/۴۳ میلی‌متر). محاسبه سرعت جریان در هر دو مدل نیز نتایج را تأیید می‌کند به طوری که در تحقیق حاضر سرعت جریان ۰/۲۵۳ متر بر ثانیه و در تحقیق جلال و حسن ۰/۲۵ متر بر ثانیه ذکر شده است. بعد از ۳۰ دقیقه عمق بی‌بعد آبستگی در تحقیق حاضر و مدل جلال و حسن به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۶۱ بود. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد که روند تغییرات برای اکثر مدل‌ها مشابه است اما مقادیر عمق آبستگی بی‌بعد متفاوت می‌باشد،

نتیجه‌گیری

در این تحقیق الگوی جریان، پروفیل بستر و توزیع تنش برشی در اطراف پایه مستطیلی به صورت عددی با استفاده از مدل Flow 3D مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، برای پایه‌ی هم‌راستا با جریان حفره‌ی آبستگی پس از ۳۰ دقیقه از شروع شبیه‌سازی، در قسمت جلوی پایه و طرفین پایه قابل شکل آن متقارن می‌باشد. با زاویه‌دار شدن پایه، الگوی جریان در اطراف پایه تغییر کرده، در نتیجه ناحیه‌ی آبستگی شکل متقارنی نخواهد داشت. همچنین برای پایه هم‌راستا با جریان میزان نوسانات سطح آب حداقل است و با زاویه‌دار شدن پایه با توجه به افزایش عرض مؤثر پایه، میزان نوسانات جریان افزایش می‌یابد. ارزیابی نتایج مربوط به تنش برشی نشان داد که با زاویه‌دار شدن پایه در پیشانی آن مقدار تنش برشی افزایش یافت به طوری که برای پایه ۱۰ درجه بیشترین مقدار و در حدود ۰/۵۵ نیوتن بر مترمربع به دست آمد. همچنین در مجاور دیواره‌ی پایه که در تماس مستقیم با جریان بود، تنش برشی افزایش یافت که برای پایه‌ی ۱۰ درجه نسبت به پایه‌ی صفر درجه، ۱۰٪ بیشتر بود. کاربرد صفحات مستغرق، تنش برشی در اطراف پایه را تحت تأثیر قرار داد، به طوری که در مقایسه با پایه‌ی بدون حمایت، در جلوی پایه مقدار

منابع

- آزمایشگاهی. نشریه آب و خاک. ۲۸(۱): ۲۶۷-۲۷۵.
- نظری شریبان، ع. ۱۳۹۵. پایان نامه ارشد: بررسی کارایی روش‌های مختلف کنترل آبستنگی در پل‌های رودخانه‌ای با استفاده از روش عددی Flow-3D. موسسه آموزش عالی پارسیان، قزوین.
- Abed, B. Sh. and Majeed, H. Q. 2020. The behavior of scouring around multiple bridge piers having different shapes. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/745/1/012158.
- Dehghani, A.A., Esmaeili, T., Chamg, W. and Dehghani, N. 2013. 3D Numerical simulation of local scouring under hydrographs. Water Management. 166(3): 120-131.
- Dey, S., Bose, S. K. and Ghandikota, L.N. 1995. Clear water scour at circular piers: a model. Journal of Hydraulic Engineering. 121(12): 869-876.
- Drysdale, D.M. 2008. The effectiveness of an aerofoilshaped pier in reducing downstream vortices and turbulence. University of Southern Queensland.
- Ettema, R., Melville, B. W. and Barkdoll, B. B. 1998. Scale effect of pier scour experiments. Journal Hydraulic Engineering. ASCE. 124(6): 639-642.
- Ghaderi, A. and Abbasi, S. 2019. CFD simulation of local scouring around airfoil-shaped bridge piers with and without collar. Sadhana (Indian Academy of Sciences). 44(10): 216.
- Ghasemi, M. and Soltani-Gerdefaramarzi, S. 2017. The scour bridge simulation around a cylindrical pier using Flow-3D. Journal of Hydrosciences and Environment. 1(2): 46-54.
- Huang, W., Yang, Q. and Xiao, H. 2009. CFD modeling of scale effects on turbulence flow and scour around bridge piers. Journal of Computers & Fluid. 38: 1050-1058.
- Jalal, H. K. and Hasan, W. H. 2020. Three-dimensional numerical simulation of local scour around circular bridge pier using Flow-3D software, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/745/1/012150.
- Jia, Y., Altinakar, M. and Guney, M. S. 2018. Three-dimensional numerical simulations of local scouring around bridge piers. Journal of Hydraulic Research, 56(3): 351-366.
- Kardan, N., Hakimzade, H. and Hasanzadeh, Y. 2017. Investigation of the dynamics bed shear stress distribution around a circular cylinder using various turbulences model. Engineering Journal. 21(7): 76-86.
- Kaustubh, Ch. and Bharat, J. 2019. CFD simulation of local scouring around bridge pier. International
- بابا گلی، ر. و رضانی، ی. ۱۳۹۵. مقایسه مدل‌های آشفتنگی در تخمین تنش برشی بستر پیرامون تکیه‌گاه پل در مقطع مرکب. نشریه دانش آب و خاک. ۲۶(۲-۳): ۹۵-۱۰۹.
- بشارتی گیوی، م. ح. و حکیم زاده، ح. ۱۳۸۹. بررسی عددی سه‌بعدی الگوی جریان و تنش برشی بستر اطراف پایه‌های مخروطی. نشریه مهندسی دریا، ۶(۱۱): ۶۳-۷۰.
- بهروزی، ز.، حمیدی فر، ح. و زمردیان م. ع. ۱۴۰۰. شبیه‌سازی عددی سرعت جریان در اطراف پایه‌های پل تکی و دو قلو با چیدمان‌های مختلف با استفاده از مدل فلونت. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۵۳(۹): (پذیرفته‌شده در نوبت چاپ).
- حسینی، س. ح. ۱۳۸۸. تأثیر توأم صفحات مستغرق و طوق در کاهش آبستنگی اطراف پایه‌های پل مستطیلی با دماغه گرد. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
- حسینی، ه.، هاتف، ن. و بیدختی، ن. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی سه‌بعدی حفره‌ی آبستنگی اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره‌ی قائم با نرم‌افزار FLOW-3D. مجله مهندسی عمران. ۲۳(۱): ۱۱۷-۲۳.
- سعادت، ا. و زین‌العابدینی، م. ۱۳۹۴. اصول شبیه‌سازی مقدماتی و پیشرفته دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم‌افزارهای FLUENT و CFX. به سفارش شرکت مهندسی پرداز پترو دانش، تهران.
- صیادی ا. ۱۳۸۷. حل معادله‌های میدان جریان و انتقال رسوب در اطراف پایه‌ی پل‌ها و محاسبه‌ی عمق آبستنگی موضعی با استفاده از روش عناصر محدود. مجله علمی پژوهشی مهندسی منابع آب. ۱(۱): ۷۷-۸۵.
- عباس نیا، ا. و محبوب، ا. ۱۳۹۴. بررسی ابعاد طوقه‌ی پایه پل در رژیم‌های مختلف جریان با استفاده از تنش برشی (با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D). کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در عمران، معماری و شهرسازی، تهران.
- قاسم‌زاده، ف. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی مسائل هیدرولیکی در FLOW-3D. انتشارات نوآور، تهران.
- کاردان، ن.، حسن‌پور، ن. و حسین زاده دلیر، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی نتایج تجربی و عددی فرسایش بستر پیرامون پایه‌های پل با مقاطع هندسی مختلف. نشریه تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۹(۷۱): ۱۹-۳۶.
- محبوب، ب.، محمد نژاد، ب. و بهمنش، ج. ۱۳۹۳. مدل‌سازی عددی آبستنگی موضعی اطراف گروه پایه پل و مقایسه با نتایج

- Research, 6(1): 55-76.
- Raudkivi, A.J. and Ettema, R. 1985. Scour at cylindrical piers in armored beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. 111(4): 713-731.
- Salaheldin, T.M., Imran, j. and Chaudhry, M.H. 2004. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers, *Journal of Hydraulic Engineering*. 130(2): 91-100.
- Yu, P. and Zhu, L. 2020. Numerical simulation of local scour around bridge piers using novel inlet turbulent boundary conditions. *Journal of Ocean Engineering*. 218: 1-15.
- Journal of Engineering and Advanced Technology. 9(1): 1870-1880.
- Lauchlan, C. S. 1999. Pier scour countermeasures. Ph.D Thesis. University of Auckland. New Zealand.
- Omara, H., Elsayed, S.M., Abdeelaal, G.M., Abd-Elhamid, H.F and Tawfik, A. 2018. Hydro morphological numerical model of the local scour process around bridge piers. *Arabian Journal for Science and Engineering*.
- Rasaei, M., Nazari, S. and Eslamian, S. 2020. Experimental and numerical investigation the effect of pier position on local scouring around bridge pier at a 90° convergent bend. *Journal of Hydraulic*

Numerical Investigation of Flow Pattern, Bed profile and Shear Stress around the Rectangular Bridge Pier Using Flow 3D

P. Royani¹, S. H. Hosseini^{2*}, Kh. Azhdary³, S. Emamgholizadeh⁴

Received: May.29, 2021

Accepted: Jul. 24, 2021

Abstract

One of the complicated phenomena in sediment hydraulic engineering is scouring around bridge pier. Regard to three-dimensional and complicated flow pattern around piers, measuring some hydraulics parameters during the tests such as flow pattern, variation of bed profile and shear stress are difficult, in this situation application of numerical models in order to extract results and more detailed study is useful. Aim of this research is numerical modeling of flow pattern, variation of bed profile and scour depth and shear stress around rectangular pier using Flow 3D and applying the results to protect piers against scouring. Results showed, for aligned pier with flow, shape of scour hole and flow pattern were symmetrical. As increase of pier angle, shear stress in front of the pier increased so that for pier with 10° angle with flow direction, shear stress was 0.55 N/m^2 . Also fluctuations of bed profile and water surface increased. Application of submerged vanes, changed scour pattern and moved sediment in front of pier which scouring was reduced. Increase of height and angle of submerged vanes improved their protective role. Base on the results of numerical model, after 30 minutes, scour depth in front of pier in aligned pier with flow and angle of submerged vanes 30° , in same level with bed, 1.25 cm and 2.5 cm on the bed, was 3.1 cm, 0.035 cm and +0.005 cm (on the bed), respectively. As increase of pier angle, performance of submerged vanes to control scouring in front of pier and in side of high-pressure wall decreased, but in side of low-pressure wall scouring compared with alone pier was less.

Keywords: Bed profile, Flow 3D, Flow pattern, Shear stress, Submerged vanes

1- MS.c graduate, Department of Water structures, Agricultural Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2-Assistant Professor, Department of Water & Soil, Agricultural Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Associate Professor, Department of Water & Soil, Agricultural Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

4-Associate Professor, Department of Water & Soil, Civil Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
(*-Corresponding author Email: sayyedhossein.hosseini@gmail.com)