بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی

بررسی عددی تاثیر پایه های قربانی شونده بر کنترل آبشستگی موضعی در گروه پایه های استوانه ای

نگارش:

مهرداد رضائیان

استاد راهنما:

دکتر امیرعباس عابدینی

بهمن ۱۳۹۷

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

و

همسر عزیزم و کلیه کسانی که در طول دوران تحصیل مشوق راه من بوده‌اند.

تشکر و قدردانی:

سزاست که مراتب قدرشناسی را به جای آورده و سپاسگزاری کنم از:

جناب آقای دکتر امیرعباس عابدینی استاد راهنمایم در علم و اخلاق که در تعلیم من دلسوزانه تلاش نمودند و از هیچ حمایتی دریغ نکردند.

اساتید محترم گروه مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی، جناب آقای دکتر احمد احمدی و جناب آقای دکتر رامین امینی که طی مدت تحصیل در دوره کارشناسی ارشد از محضرشان استفاده نمودم و زحمت داوری این پایان‌نامه را هم بر عهده گرفتند کمال تشکر را دارم.

و دوستان خوبم در گروه مهندسی عمران صمیمانه تشکر می‌کنم و آرزوی موفقیت برای تمامی کسانی که مرا صادقانه در این دوره همراهی کرده و از هیچ کمکی فروگذار نکردند.

از خانواده عزیزم که در انجام مراحل این پایان‌نامه به بنده کمک کرده‌اند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم و از خداوند متعال برای آن‌ها توفیق روزافزون را خواستارم.

تعهدنامه

اینجانب مهرداد رضائیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه" بررسی عددی تاثیر پایه های قربانی شونده بر کنترل آبشستگی موضعی در گروه پایه های استوانه ای " تحت راهنمائی آقای دکتر امیرعباس عابدینی متعهد می‌شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

جابه‌جایی ذره‌های رسوب ناشی از تغییر الگوی جریان، آبشستگی نامیده می شود . این پدیده یکی از دلایل پایدار نبودن پل‌ها و در نهایت خراب شدن آنها به شمار می رود . از این رو ارائه روش هایی برای مهار و کاهش آبشستگی اهمیت دارد . به کارگیری تجهیزاتی مانند پایه های قربانی شونده جلوی پایه های پل برای فراهم ساختن پایداری پل ها میتوانند راهکار مناسب برای رسیدن به این هدف باشد . در این تحقیق نخست با استفاده از نرم افزار Flow 3D نمونه آزمایشگاهی را مدل کرده و با نتایج آن مقایسه و صحت سنجی کردیم ، بدین منظور به بررسی و تحلیل عمق حفره آبشستگی در حالات ذیل پرداختیم که میزان کاهش عمق آبشستگی در هر حالت بیان شده است : ۱- در حالت تک پایه با پایه های قربانی شونده و بدون پایه های قربانی شونده ،۵۴٪ ۲- در حالت دو پایه با پایه های قربانی شونده و بدون پایه های قربانی شونده ، روی پایه اول ۴۶ ٪ ، روی پایه دوم ۲۷ ٪ ، علت کاهش تاثیر را می‌توان شکل گیری مجدد جریان توسعه یافته در پایین دست پایه اول بیان کرد . ۳- در حالت سه پایه با پایه های قربانی شونده و بدون پایه های قربانی شونده ، روی پایه اول ۴۸٪ ، روی پایه دوم ۲۸٪ ، روی پایه سوم ۳۱٪ ، علت کاهش تاثیر را میتوان وجود پایه اول در برابر جریان دانست که خود همانند قربانی شونده بزرگتر عمل میکند .

کلید واژه : آبشستگی ، FLOW-3D ، تک پایه، دوپایه، سه‌پایه، پایه‌های قربانی شونده .

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فصل ۱- کلیات تحقیق ۱

۱-۱- پیشگفتار ۲

۱-۲- روش ، ضرورت و اهداف تحقیق ۴

۱-۳- ساختار پایان‌نامه ۷

فصل ۲- مکانیزم آبشستگی در اطراف پایه پل‌ها ۹

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- الگوی جریان و مکانیزم آبشستگی در اطراف پایه‌های پل ۱۰

۲-۲-۱- سیستم گردابی نعل اسبی ۱۱

۲-۲-۲- سیستم گردابی شیاری ۱۳

۲-۲-۳- سیستم گردابی دنبالهدار ۱۳

۲-۲-۴- سیستم موج کمانی ۱۴

۲-۳- الگوی جریان و مکانیزم آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها ۱۵

۲-۳-۱- اثر تقویت کردن ۱۵

۲-۳-۲- اثر محافظت یا پناه دادن ۱۶

۲-۳-۳- گرداب‌های جاری ۱۶

۲-۳-۴- به هم فشردگی گردابه نعل اسبی ۱۷

۲-۴- جدایی و منطقه wake ۱۷

۲-۵- جداشدگی خطوط جریان در اطراف پایه ۱۸

۲-۶- پارامترهای مؤثر در پدیده آبشستگی ۲۰

۲-۷- آبشستگی در اطراف تکیهگاههای پل‌ها ۲۲

۲-۸- الگوی جریان و مکانیزم آبشستگی در اطراف تکیهگاههای پل‌ها ۲۳

۲-۹- روشهای غیرمستقیم کاهش آبشستگی ۲۳

۲-۹-۱- بندکشی ۲۳

۲-۹-۲- لوله‌های متصل ۲۴

۲-۹-۳- طوق ۲۵

۲-۹-۴- گروه پایه‌ها ۲۸

۲-۹-۵- شکاف ۲۹
۲-۹-۶- صفحات منحرف‌کننده جریان ۳۰
۲-۹-۷- تغییر شکل پایه ۳۱
۲-۹-۸- پایه‌های قربانی شونده ۳۱
۲-۹-۹- دندانه‌ها و پمپاژ جریان ۳۳
۲-۱۰- روش‌های حفاظت مستقیم ۳۳
۲-۱۱- مروری بر مطالعات گذشته ۳۴
۲-۱۱-۱- مطالعات اینگلیس پونا ۱۹۴۹ ۳۴
۲-۱۱-۲- لارسن و تاچ (۱۹۵۶) ۳۵
۲-۱۱-۳- لی و همکاران (۱۹۶۱) ۳۵
۲-۱۱-۴- شن-مازا (۱۹۶۹) ۳۷
۲-۱۱-۵- روش دانشگاه ایالتی کلرادو(۱۹۷۵)-(CSU) ۳۸
۲-۱۱-۶- ریچاردسون(۱۹۹۱)-HEC18 ۳۸
۲-۱۱-۷- وله و باچ (۱۹۹۹) ۳۹
۲-۱۱-۸- رابطه دانشگاه ایالتی کلرادو (۲۰۰۱) ۴۰
۲-۱۱-۹- تامر (۲۰۰۵). ۴۲
۲-۱۱-۱۰-شریعت رضوی و همکاران۱۳۹۱ ۴۲
۲-۱۱-۱۱-مطالعات بین المللی در زمینه پایه های قربانی شونده ۴۲
۲-۱۲- جمع‌بندی ۴۵
فصل ۳- روش تحقیق ۴۷
۳-۱- مقدمه ۴۸
۳-۲- معرفی نرم‌افزارهای محاسبات عددی ۴۸
۳-۳- معادلات حاکم بر جریان ۵۲
۳-۳-۱- معادله پیوستگی ۵۲
۳-۳-۲- معادلات اندازه حرکت ۵۳
۳-۳-۳- مدلهای آشفتگی ۵۴
۳-۴- معرفی نرم افزار FLOW-3D ۶۱
۳-۴-۱- مدلهای آشفتگی مورد استفاده در نرمافزار Flow-3D ۶۲
۳-۴-۲- خصوصیات خاص و منحصربه فرد نرم افزار Flow-3D ۶۳
۳-۴-۳- مدل آبشستگی ۶۳

۳-۴-۴- موارد کاربرد صنعتی نرم افزار Flow-3D ۶۸
۳-۵- شرح مدل پایه های قربانی شونده در گروه پایه های استوانه ای ۶۸
۳-۶- شبیه‌سازی هندسی پایههای دایره‌ای پل و بستر فرسایش‌پذیر در مدل‌سازی عددی جریان و آبشستگی پایه پل ۷۲
۳-۶-۱- شبیه‌سازی هندسی پایه‌های دایره‌ای و بستر فرسایشی ۷۳
۳-۷- جمع بندی ۷۶

فصل ۴- تحلیل و بررسی نتایج مدلسازی عددی ۷۷

۴-۱- مقدمه ۷۸
۴-۲- مراحل شبیه‌سازی تاثیر پایه های قربانی شونده بر کنترل آبشستگی ۷۸
۴-۲-۱- بخش اول Naviagtor ۷۸
۴-۲-۲- بخش دوم Model Setup ۷۹
۴-۲-۳- شبیه‌سازی (Simulate) ۸۷
۴-۲-۴- تحلیل نتایج (Analyse) ۸۷
۴-۲-۵- نمایش نتایج (Display) ۸۸
۴-۳- کالیبراسیون و صحت سنجی مدل‌سازی عددی ۸۸
۴-۴- بررسی و تحلیل نتایج مدل عددی ۱۰۰
۴-۴-۱- مدلسازی عددی تک پایه در حالت با و بدون استفاده از پایه‌های قربانی شونده ۱۰۰
4-4-2- مدلسازی عددی دو پایه در حالت با و بدون استفاده از پایه‌های قربانی شونده ۱۰۲
۴-۴-۳- مدلسازی عددی سه پایه در حالت با و بدون استفاده از پایه‌های قربانی شونده ۱۰۴
۴-۵- جمع بندی ۱۰۸

فصل ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۱

۵-۱- مقدمه ۱۱۲
۵-۲- نتیجه گیری ۱۱۲
۵-۳- پیشنهادات ۱۱۴

فهرست منابع ۱۱۵

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: مقدار ضریب اصلاحی برای پایههای پل ۳۷

جدول ۲-۲: ضریب k2 با توجه به زاویه هجوم آب و نسبت طول به عرض پایه پل........ ۳۹

جدول ۲-۳: ضریب k3 وضعیت بستر ۳۹

جدول ۴-۱: درصد خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاه برای حالت تک پایه ساده........ ۹۸

جدول ۴-۲: درصد خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاه برای گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه اول........ ۹۸

جدول ۴-۳: درصد خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاه برای گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه دوم........ ۹۹

جدول ۴-۴: درصد خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاه برای گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه سوم........ ۹۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: الگوی جریان در اطراف پایه استوانهای شکل [۵] ۱۴

شکل ۲-۲: جریان رو به پایین و سیستم‌های گردابی اطراف پایه استوانهای پل [۵] ۱۵

شکل ۲-۳: نمایش منطقه جدایی هنگام برخورد سیال با سطح منحنی ۱۸

شکل ۲-۴: نمایش منطقه wake پشت پایه پل ۱۹

شکل ۲-۵: شکل‌های مختلف تکیهگاه ۲۳

شکل ۲-۶:بندکشی پایه پل. (الف): بندکشی یک ردیفه. (ب): دو ردیفه. (ج): سه ردیفه ۲۴

شکل ۲-۷: (الف): نمای جانبی. (ب):پاتن مقاطع لولههای اتصال در داخل پایه پل ۲۴

شکل ۲-۸: گروه سه‌پایه جهت کاهش آبشستگی. (الف):پلان از مقطع گروه پایهها. (ب):نمای جانبی ۲۸

شکل ۲-۹: کاربرد شکاف به‌منظور کاهش آبشستگی ۲۹

شکل ۲-۱۰: کاربرد پرههای منحرف‌کننده مسیر جریان به‌منظور کاهش آبشستگی ۳۰

شکل ۲-۱۱: انواع اشکال پایههای مؤثر در کاهش آبشستگی ۳۱

شکل ۲-۱۲: الف) آرایش مثلثی. ب)آرایش عمود بر مسیر جریان پایههای قربانی شونده ۳۲

شکل ۲-۱۳: حالت‌های مختلف شکل‌های پایه پل ۳۶

شکل ۲-۱۴: الگوی پایه های اصلی و چیدمان پایه های قربانی شونده و زاویه برخورد جریان به پایه ها در مطالعات Melville و همکاران در سال ۲۰۰۰ ۴۳

شکل ۲-۱۵: شرایط مدلسازی آزمایشگاهی پایه قربانی شونده در مطالعات Kayatürk و Gögüs در سال ۲۰۰۶ ۴۴

شکل ۲-۱۶: شرایط چیدمان پایه های قربانی شونده در مطالعات Park و همکاران در سال ۲۰۱۵ و همچنین گیرکردن قطعات معلق در جریان در نواحی پایه های قربانی شونده ۴۵

شکل ۳-۱: مشخصات مدل آزمایشگاهی در مطالعات حیدرپور و همکاران در سال ۱۳۹۲ ۶۹

شکل ۳-۲: منحنی دانه بندی مشخصات مصالح بستر در مطالعات حیدرپور و همکاران در سال ۱۳۹۲ ۷۱

شکل ۳-۳: مشخصات پایه ها به همراه پایه های قربانی شونده در مطالعات آزمایشگاهی ۷۱

شکل ۳-۴: شبیه سازی هندسه سه‌بعدی کانال جریان، بستر رسوبی، پایه پل‌ها توسط نرم افزار SolidWork ۷۵

شکل ۴-۱: بلوک شبکه بندی پایه پل‌ها با مقاطع دایروی و بستر فرسایش پذیر در مدل عددی Flow3D ۸۲
شکل ۴-۲: سلولهای محاسباتی بر روی بلوک شبکه بندی بستر در مدل عددی Flow3D ۸۲
شکل ۴-۳: شرایط مرزی اعمال شده در شبیه سازی جریان بر روی مدل عددی پایه پل و کانال شبیه‌سازی آبشستگی بستر در Flow3D ۸۵
شکل ۴-۴: شبکه بندی های مختلف و انتخاب شبکه بندی صحت سنجی شده برای هندسه مدل ۹۱
شکل ۴-۵: مراحل مختلف محاسباتی زمانی پایداری جریان در کانال برای محور مرکزی کانال ۹۳
شکل ۴-۶: پایدار شدن جریان در کانال مدل‌سازی جریان بر اساس مجموع دبی خروجی از مرز انتهای کانال ۹۴
شکل ۴-۷: مقایسه عددی و آزمایشگاهی توسعه زمانی عمق حفره آبشستگی در پایه تکی ساده ۹۵
شکل ۴-۸: مقایسه عددی و آزمایشگاهی توسعه زمانی عمق حفره آبشستگی در گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه اول ۹۶
شکل ۴-۹: مقایسه عددی و آزمایشگاهی توسعه زمانی عمق حفره آبشستگی در گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه دوم ۹۶
شکل ۴-۱۰: مقایسه عددی و آزمایشگاهی توسعه زمانی عمق حفره آبشستگی در گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه سوم ۹۷
شکل ۴-۱۱: نتایج مدل عددی برای عمق نسبی حفره آبشستگی در پایه منفرد در دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده ۱۰۱
شکل ۴-۱۲: نتایج مدل عددی برای عمق نسبی حفره آبشستگی در گروه پایه دو تایی در دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه اول) ۱۰۳
شکل ۴-۱۳: نتایج مدل عددی برای عمق نسبی حفره آبشستگی در گروه پایه دو تایی در دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه دوم) ۱۰۴
شکل ۴-۱۴: نتایج مدل عددی برای عمق نسبی حفره آبشستگی در گروه پایه سه تایی در دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه اول) ۱۰۵
شکل ۴-۱۵: نتایج مدل عددی برای عمق نسبی حفره آبشستگی در گروه پایه سه تایی در دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه دوم) ۱۰۵
شکل ۴-۱۶: نتایج مدل عددی برای عمق نسبی حفره آبشستگی در گروه پایه سه تایی در دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه سوم) ۱۰۶

شکل ۴-۱۷: مقایسه شرایط مختلف پایه ها تکی، دو پایه ای و سه پایه ای در حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه اول) ۱۰۷
شکل ۴-۱۸: مقایسه شرایط مختلف گروه پایه های دو و سه تایی در حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه دوم) ۱۰۸

فصل اول

کلیات تحقیق

۱-۱- پیشگفتار

یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب پل‌ها آبشستگی[1] اطراف پایه های آن‌ها است. بحث آبشستگی هرچند قدمتی طولانی در علم هیدرولیک دارد، لیکن به دلیل شرایط و پیچیدگی‌های خاص آن و همچنین به دلیل نبودن رابطه‌ای مناسب که بتواند پاسخگوی تمامی شرایط باشد همچنان مورد توجه خاص محققین علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه است.

روشی که معمولاً برای تعیین میزان عمق آبشستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌کارگیری روابط تجربی و یا استفاده از مدل‌های فیزیکی است. لازم به ذکر است علی‌رغم این‌که تاکنون مطالعات وسیعی جهت برآورد آبشستگی موضعی اطراف سازه‌های هیدرولیکی مختلف انجام‌شده است، اما هنوز رابطه‌ای عمومی و جامع برای محاسبه عمق آبشستگی موضعی اطراف هیچ‌کدام از سازه‌های رودخانه‌ای ارائه نشده است. همچنین نظر به این‌که مبانی تئوری و تجربی روش‌های مختلف بعضاً متفاوت بوده است، لذا مقدار آبشستگی موضعی محاسبه‌شده بر اساس روش‌های مختلف الزاماً یکسان و یا نزدیک به یکدیگر نیست. علاوه بر این اکثر مطالعات در شرایط مختلف آزمایشگاهی روی بستر ماسه‌ای و برای شرایط تعادل آبشستگی ارائه‌شده است، اما در طبیعت شدت فرسایش‌پذیری مواد بستر رودخانه به زمان بستگی دارد به‌طوری‌که بستر رودخانه‌های پوشیده از گرانیت سال‌های زیادی طول می‌کشد فرسایش یابد درحالی‌که رودخانه‌هایی با بستر ماسه‌ای در فاصله زمانی بسیار کوتاه حداکثر عمق آبشستگی را دارا است بنابراین کاربرد این روابط برای شرایط طبیعی رودخانه عدم اطمینان‌هایی را در برآورد مقدار آبشستگی به همراه دارد. بدیهی است استفاده از یک روش بدون توجه به شرایط حاکم بر آن روش، مناسب نیست. معمولاً توصیه می‌شود محاسبه عمق آبشستگی با روش‌های مختلف انجام شود و درنهایت بر اساس قضاوت مهندسی مقدار آبشستگی موضعی تعیین شود. در بسیاری از موارد نیز می‌توان از مدل‌های فیزیکی برای تخمین عمق آبشستگی کمک گرفت.

---

[1] Scour

شکست پل ناشی از آبشستگی کلی در فونداسیون (شامل پایه و تکیه‌گاه)، ضرورت مطالعه در مورد پیش‌بینی آبشستگی و راه‌های محافظت در برابر آن را کاملاً روشن می‌سازد. بر طبق مطالعات ملویل[1] (۱۹۹۲)، از ۱۰۸ شکست پل که در فاصله سال‌های ۱۹۸۴-۱۹۶۰ در نیوزیلند رخ داد، ۲۹ مورد آن مربوط به آبشستگی تکیه‌گاه پل بود. ملویل همچنین خاطرنشان می‌سازد که ۷۰ درصد هزینه‌ها روی شکست پل در نیوزیلند ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه پل بوده است. داده‌ها نشان می‌دهند که مشکل آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها بسیار مهم است. مطالعات انجام‌شده بر روی شکست۳۸۳ پل در ایالات‌متحده نشان می‌دهد که ۲۵ درصد تخریب پایه و در ۷۲ درصد تخریب تکیه‌گاه علت شکست پل بوده است [۱].

زمانی که فرآیند آبشستگی در حضور گروه پایه اتفاق می افتد، مکانیزم هایی بوجود می آید که این فرآیند را پیچیده تر از فرآیند آبشستگی در تک پایه ها می کند و باعث تغییر عمق و شکل آبشستگی در اطراف پایه ها نسبت به تک پایه ها می شود. چهار مکانیزم مهمی که آبشستگی در گروه پایه ها را تحت تأثیر قرار می دهد عبارتند از:

- **عامل تقویت کننده**
- **عامل حفاظت کننده**
- **گرداب های جاری شونده**
- **گرداب های نعل اسبی فشرده شده**

که در این مطالعه به دلیل استفاده از پایه های قربانی شونده، وجود پایهٔ بالادست باعث کاهش سرعت مؤثر جریان برای پایهٔ پائین دست و بنابراین کاهش آبشستگی در آن می شود. شکل دیگر عامل حفاظ بودن در صورتی پدید می آید که مواد شسته شده از اطراف پایهٔ بالادست روی بستر در جلوی پایهٔ پائین دست نشست کرده و در این صورت جریان از بستر اطراف پایهٔ پائین دست بطرف بالا منحرف شده و قدرت گرداب نعل اسبی در این پایه کاهش پیدا می کند.

۱-۲- روش ، ضرورت و اهداف تحقیق

مدل، فرآیند یا سامانه‌ای است که فرآیند یا سامانۀ دیگری را شبیه‌سازی کرده و نمایش می‌دهد، بطوریکه می‌توان در زمان‌های متناظر، بین این دو، ارتباط‌های مشخصی برقرار نمود. به‌عبارت‌دیگر یک مدل، خواص مکانی و زمانی یک سیستم یا بخش‌هایی از آن را به‌صورت فیزیکی و یا ریاضی شبیه‌سازی می‌کند. در واقع مدل برای تشریح علت یک پدیده، از روابط ریاضی بین علت و معلول استفاده می‌کند. با توجه به این‌که بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی دارای شرایط مرزی پیچیده‌ای بوده و تعداد متغیرهای مؤثر بر آنها زیاد هستند، امکان دستیابی به رابطه‌ای ریاضی برای این پدیده‌ها بر اساس قوانین و تئوری‌های موجود مشکل است. لذا برای شناخت دقیق رفتار هیدرولیکی و قانونمند کردن این‌گونه پدیده‌ها، نیاز به ساخت و مطالعه روی مدل هیدرولیکی است [۲].

مدل‌های فیزیکی بسیار پرهزینه هستند و کاربرد آنها محدود به همان نمونه‌ای است که مدل برای آن ساخته‌شده و ایجاد تغییر هرچند جزئی در آنها بسیار پرهزینه است. برای ساخت مدل‌های فیزیکی نمونۀ اصلی را با استفاده از اعداد بی‌بعد (مانند عدد فرود یا رینولدز) با مقیاس معینی کوچک می‌کنند، به‌طوری‌که مقدار این اعداد بی‌بعد در واقعیت و مدل یکی باشد. اما همواره مقدار یکی از اعداد بی‌بعد در مدل و واقعیت یکسان نیست و درنتیجه تمامی عوامل مؤثر بر پارامترهای جریان به‌طور مناسب مدل نشده که نکتۀ منفی این روش محسوب می‌گردد. نقطه‌ضعف دیگر مدل‌های فیزیکی در این موارد این است که تغییر مقیاس بین مدل و واقعیت تنها در مورد جریان آب انجام می‌شود و حباب‌های هوا و یا رسوبات شناور در جریان، چون امکان کوچک‌تر شدن ندارند مشکلاتی در شبیه‌سازی فیزیکی پدید می‌آورند. مدل‌های عددی در مسائل هیدرولیک در چند سال اخیر با پیشرفت کامپیوترها نقش بسزایی در مسائل پیچیدۀ جریان ایفا کرده‌اند. جهت تفسیر بهتر مدل‌های عددی می‌توان توانمندی‌ها و ضعف آن را به‌صورت زیر تشریح کرد [۳]:

توانمندی های مدل عددی

- هزینهٔ کم: مهم‌ترین امتیاز یک پیشگویی محاسباتی هزینهٔ پایین آن است. در بیشتر کاربردها، هزینهٔ بکار بردن یک برنامهٔ کامپیوتری به‌مراتب کمتر از مخارج تحقیق آزمایشگاهی مشابه است.
- سرعت: یک تحقیق محاسباتی می‌تواند با سرعت فراوانی انجام شود. طراح می‌تواند مفاهیم صدها ترکیب از حالت‌های مختلف را در زمانی کوتاه بررسی کرده و طرح بهینه را انتخاب نماید. از طرف دیگر، به‌سادگی می‌توان تصور کرد رسیدگی یا تحقیق آزمایشگاهی مشابه نیاز به زمان زیادی خواهد داشت.
- اطلاعات کامل: حل کامپیوتری یک مسئله، اطلاعات کامل و جزئیات لازم را به ما خواهد داد و مقادیر تمام متغیرهای مربوطه را در سراسر میدان موردنظر به دست می‌دهد. بنابراین حتی وقتی کار آزمایشگاهی انجام می‌شود، به‌منظور تکمیل اطلاعات آزمایشگاهی بسیار باارزش خواهد بود که حل کامپیوتری هم‌زمان با آن به دست آید.
- توانایی شبیه‌سازی شرایط واقعی: در محاسبهٔ تئوری، شرایط واقعی به‌آسانی می‌توانند شبیه‌سازی شوند. دیگر نیاز نیست تا مدل‌های با مقیاس کوچک ساخته شود. برای یک برنامه کامپیوتری، داشتن ابعاد هندسی بسیار بزرگ یا خیلی کوچک، تعقیب فرایندهایی بسیار سریع یا خیلی آهسته هیچ‌کدام مشکل مهمی ایجاد نمی‌کنند.
- توانایی شبیه‌سازی شرایط ایده آل: گاهی اوقات برای مطالعهٔ پدیدهٔ اساسی، از یک روش پیشگویی استفاده می‌شود. در این مطالعه، شخص توجهش را روی تعداد کمی از پارامترهای اصلی متمرکز نموده و تمام جنبه‌های دیگر را حذف می‌کند و بدین ترتیب ممکن است شرایط ایده آل موردبررسی قرار گیرد. از طرفی، حتی در یک آزمایش عملی دقیق به‌سختی می‌توان به شرایط ایده آل نزدیک شد.

تعیین تغییرات بستر و عمق حفره آبشستگی اطراف پایه یک پل که در بستر رودخانه احداث‌شده از نظر کنترل پایداری سازه حائز اهمیت است. ازاین‌رو تحقیقات وسیعی برای دستیابی به روش‌هایی که بتوان آبشستگی موضعی را کنترل و مقدار آن را کاهش داد، انجام می‌پذیرد. لذا در این تحقیق باهدف بررسی اثرات آبشستگی موضعی اطراف پایه های قربانی شونده و نیز شبیه‌سازی آن با قرارگیری دو پایه در مجاورت یکدیگر مورد بررسی قرارگرفته است. برای رسیدن به هدف فوق یک مدل آزمایشگاهی که مطالعه مدل فیزیکی بر روی آن انجام‌شده است انتخاب می‌گردد و در مدل عددی Flow3D با شرایط مشابه آزمایشگاهی مدل‌سازی می‌گردد و تغییرات توپوگرافی بستر تحت شرایط یکسان در مدل عددی و مدل فیزیکی موردبررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

در مطالعاتی که تا به حال در مورد روش‌های کاهش آبشستگی صورت گرفته است، کمتر به گروه پایه ها توجه شده است حال آنکه عملکرد آبشستگی در گروه پایه ها بسیار پیچیده تر از تک پایه ها می باشد و با توجه به اینکه در کارهای مهندسی استفاده از گروه پایه ها متداول تر است، می طلبد که تحقیقات بیشتری روی عملکرد آبشستگی در گروه پایه ها انجام پذیرد.

همچنین هر روش معقول و اقتصادی که بتوان به واسطه آن از شدت جریان رو به پایین آب کاست و به واسطه آن آب با شدت کمتری به رسوبات اطراف پایه برخورد کند می تواند در کاهش میزان آبشستگی رسوبات اطراف پایه موثر باشد . در روشهای کاهش آبشستگی تا به حال تمرکز بیشتر روی رفع پارامترهای هیدرولیکی موثر بر کاهش آبشستگی و همچینن استفاده از سنگچین ، طوق و شیار بوده است که از لحاظ اجرایی دارای محدودیت می باشد .

که در این تحقیق ما با استفاده از پایه هایی در جلوی پایه های اصلی تحت عنوان پایه های قربانی شونده که تا به حال در گروه پایه ها انجام نشده است قصد داریم میزان کاهش آبشستگی را اندازه‌گیری کنیم . ضمنا اینکه اغلب کارهای انجام شده در زمینه آزمایشگاهی بوده است و بررسی عددی آن کمتر مورد بررسی قرار گرفته است . بررسی عددی دینامیک سیالات روشی است برای شبیه سازی جریان که در آن معادلات استاندارد جریان مانند معادلات ناویر استوکس و معادله

پیوستگی گسسته سازی می شوند ، شبیه سازی عـددی بـا اسـتفاده از نـرم افـزار از جهـاتی شـبیه آزمایش است بطوریکه اگر شرایط آزمایش نتواند آنطور که باید شرایط واقعی را توصـیف کنـد نتـایج بدست آمده از آزمایش نیز بازگو کننده نتـایج واقعـی نخواهـد بـود از ایـن رو در محاسـبات عـددی چنانچه شرایط معرفی شده به مدل عددی مناسب نباشد نتایج قابل استناد نمی باشد .

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

در این پژوهش پس از فصل حاضر که به‌عنوان پیشگفتار ارائه شده است. در فصل دوم ضمن معرفـی انواع مختلف آبشستگی هـا بـه بررسـی روابـط موجـود در زمینـه طراحـی و محاسـبات پارامترهـای هیدرولیکی در آبشستگی پایـه پـل هـا پرداختـه خواهـد شـد و در ادامـه همـین فصـل بـه بررسـی جدیدترین و مهمترین منابع موجود در زمینه موضوع تحقیق اشاره خواهد شد. در فصل سـوم ضـمن آشنایی بـا معـادلات حـاکم در مـدل هـای عـددی و روش هـای دینامیـک سـیالات محاسـباتی در شبیه‌سازی جریان مدل های مختلـف آشـفتگی در مـدل عـددی Flow3D معرفـی خواهنـد شـد و مناسب ترین مدل آشفتگی برای این مدلسازی انتخاب خواهد شد. در همین راستا هندسه گروه پایـه های دایروی و مش بندی مدل عددی نیز در نرم‌افزار SolidWork انجـام خواهـد شـد کـه در ایـن فصل به آن نیز پرداخته مـی‌شـود. در فصـل چهـارم نیـز بـه نتـایج حاصـل از شـبیه‌سـازی عـددی (کالیبراسیون و اجرای مدل) توسط مدل عددی Flow3D پرداختـه خواهـد شـد و نتـایج حاصـل از مدل عددی تحلیـل و تفسـیر خواهنـد شـد. در ایـن راسـتا مـدل عـددی کـالیبره و درصـد خطـای شبیه‌سازی نسبت به مدل آزمایشگاهی نیز بیان می‌شود. سپس مـدل عـددی بـرای شـرایط مختلـف بررسی عددی تاثیر پایه های قربانی شونده بر کنترل آبشستگی موضعی در گروه پایـه هـای اسـتوانه ایتوسعه داده خواهد شد. در نهایت در فصل پنجم نتیجه گیـری حاصـل از ایـن مطالعـه پژوهشـی و پیشنهادهایی جهت ادامه این پژوهش ارائه می شود.

فصل دوم

تعاریف پایه و مطالعات پیشین

۲-۱-مقدمه

پل‌ها در محل احداث خود به چند دلیل باعث آبشستگی در رودخانه‌ها می‌شوند. اول این‌که برای کوتاه کردن طول پل، مقطع پل تنگ‌تر از مقطع رودخانه در نظر گرفته می‌شود که باعث افزایش سرعت جریان و تنش برشی در بستر شده و موجب آبشستگی می‌شود (آبشستگی بر اثر تنگ‌شدگی). دوم به دلیل وجود پایه و تکیه‌گاه یک سامانه گردابی سه‌بعدی جریان در اطراف آنها تولیدشده که باعث جدا شدن دانه‌ها از بستر و آبشستگی موضعی می‌شود. این نوع آبشستگی به دلیل پیچیده بودن جریان‌های ایجادشده دارای اهمیت زیادی است. اگر آبشستگی عمومی در مسیر رودخانه وجود داشته باشد، آن‌هم به آبشستگی حاصل از احداث پل اضافه می‌شود.

پایه‌های پل با توجه به نظر طراح آن می‌تواند به انواع شکل‌ها و آرایش‌ها ساخته شوند. مثلاً یک طراح می‌تواند پایه‌ها را به شکل مستطیلی، گرد یا به‌صورت تک‌پایه، یا گروه پایه با آرایش‌های مختلف طراحی کند. پایه‌های اکثر پل‌های بزرگی که در جهان ساخته‌شده و مورد بهره‌برداری قرارگرفته‌اند، به‌صورت گروه پایه گرد طراحی‌شده‌اند. در پل‌های بزرگ برای نگه‌داشتن بدنه پل اگر از تک‌پایه استفاده شود، پایه ضخامت زیادی لازم دارد که افزایش ضخامت پایه باعث افزایش هزینه‌های اجرایی و افزایش عمق آبشستگی خواهد شد. ولی در صورت، استفاده از گروه پایه ضخامت زیاد تک‌پایه به ضخامت‌های کوچک‌تر تفکیک‌شده و هزینه‌ها و میزان آبشستگی را کاهش می‌دهد. در ادامه به بررسی الگوی جریان و آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل پرداخته می‌شود و روش‌های برآورد آبشستگی معرفی می‌گردد.

۲-۲-الگوی جریان و مکانیزم آبشستگی در اطراف پایه‌های پل

الگوی جریان در اطراف پایه‌های پل بسیار پیچیده بوده که این پیچیدگی با تشکیل حفره آبشستگی در اطراف پایه تشدید می‌شود. سامانه‌های گردابی پیچیده‌ای در اطراف پایه به وجود می‌آید که عملکرد آنها باعث حفر گودالی در اطراف پایه‌ها شده که حفره آبشستگی نامیده می‌شود. توسعه این

گودال در اطراف پایه‌ها باعث خالی شدن زیر پی‌ها و درنتیجه خرابی آنها و خرابی پل می‌شود. دو عامل مهم باعث ایجاد چنین سامانه‌هایی می‌شود. یکی برخورد جریان به پایه و دیگری جدا شدن جریان از پایه پل است. الگوی جریانی که در اطراف پایه پل شکل می‌گیرد به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با یکی از این دو عامل در ارتباط است. بسته به نوع پایه و شرایط جریان، سیستم گردابی ممکن است ترکیبی از سیستم‌های زیر باشد:

- سیستم گردابی نعل‌اسبی[1]
- سیستم گردابی شیاری یا برخاستگی[2]
- سیستم گردابی دنباله‌دار[3]
- سیستم گردابی رو به پایین[4]
- سیستم گردابی موج‌کمانی[5]

۲-۲-۱-سیستم گردابی نعل اسبی

پس از برخورد جریان با پایه فشار موضعی به وجود آمده و درنتیجه باعث جدا شدن خطوط جریان خواهد شد. این خطوط جریان گردابی با جریان دست‌نخورده تداخل نموده و در جلوی پایه متمرکز می‌شود و باعث حفر گودالی در جلوی پایه می‌شود. چرخش آب در داخل گودال جلوی پایه به دو طرف پایه نیز کشیده می‌شود و درمجموع گردابی به نام گرداب نعل‌اسبی ایجاد می‌کند. چنانچه پایه حجیم باشد، گرادیان فشار کافی ایجاد می‌کند که موجب وقوع مرحله فوق می‌شود. زیرا برای پایه‌های

[1] Horse shoe vortex
[2] Wake vortex
[3] Trailing vortex
[4] Down flow vortex
[5] Bow wave vortex

نوک‌باریک فشار تولیدشده نسبتاً قوی نبوده تا باعث جداشدگی[1] خطوط جریان گردد و درنتیجه گرداب نعل اسبی به وجود نخواهد آمد.

بقیه اشکال مانند پایه عدسی شکل بسته به نحوه قرار گرفتن محور پایه با جهت جریان ممکن است به‌صورت نوک‌تیز و یا جسم حجیم عمل کنند. به‌نحوی‌که اگر محور پایه با جهت جریان زاویه‌ای را تشکیل دهد که بیش از ۳۰ درجه باشد، می‌تواند زاویه حمله را تغیر دهد، به‌طوری‌که پایه به‌صورت یک جسم حجیم عمل نماید. همچنین اگر خار و خاشاک و الوار چوب در نوک پایه جمع شود به‌صورت یک جسم حجیم عمل خواهد کرد و ضمن تشکیل جریان‌های گردابی نعل‌اسبی میزان آبشستگی شدت خواهد یافت و حفره بزرگی در نوک پایه ایجاد خواهد شد. جریان گردابی به‌صورت عمودی و از بالا به پایین عمل می‌کند و محور این جریان افقی است و حوزه عمل این سیستم گردابی اطراف پایه است.

جریان گردابی نعل‌اسبی درنتیجه جداشدگی جریان لبه بالایی حفره آبشستگی به وجود می‌آید و این سیستم از نتایج آبشستگی است. گرداب نعل‌اسبی گودال آبشستگی را گود می‌کند تا زمانی که تنش برشی بحرانی کمتر شود. شتاب جریان در دو طرف پایه دو شکاف در بستر ایجاد می‌کند که انتقال (پاک کردن) رسوب از گودال آبشستگی بالادست در پیرامون پایه را آسان می‌کند. طبق نظر بعضی محققان، این سیستم در ابتدا کوچک و قدرت آن ضعیف است ولی پس از تشکیل حفره آبشستگی، سیستم جریان نعل‌اسبی ازلحاظ اندازه و قدرت نیز رشد می‌یابد. با افزایش عمق آبشستگی (گودشدن حفره)، مقدار جریان رو به پایین در نزدیکی کف حفره کاهش‌یافته و زمانی که قدرت نیروهای محرک تقریباً برابر با نیروهای مقاوم (وزن اشباع ذره) گردید، آبشستگی متوقف می‌شود.

ملویل (۱۹۷۷)، جهت جریان، تنش برشی و سرعت جریان در اطراف پایه‌های استوانه‌ای شکل را اندازه‌گیری کرد. او دریافت که جریان گردابی نعل‌اسبی با سرعت زیاد رو به پایین در جلوی پایه

---

[1] separation

گستری می‌یابد. اندازه چرخش این سیستم و بزرگ شدن این حفره به‌سرعت افزایش‌یافته ولی پس‌ازآنکه آبشستگی به حالت تعادل رسید، میزان چرخش، تنش برشی و سرعت کاهش می‌یابد [۴].

۲-۲-۲-سیستم گردابی شیاری

این سیستم به‌وسیله خود پایه به وجود می‌آید و جهت آن برعکس سیستم گردابی نعل اسبی، به‌طرف بالا است. این سیستم بر اثر غلتیدن لایه‌ها به‌طرف بالا که بر روی سطح پایه به وجود می‌آید تشکیل می‌شود و در خط جداشـــدگی از هر طرف پایه جدا می‌شود. در مقـــادیر عدد رینولـــــدز کم (۵۰> R_e > ۵-۳)، این سیستم گردابی، پایدار است و در پایین‌دست نزدیک‌پایه، یک سیستم مقاوم را تشکیل می‌دهد.

قدرت این سیستم به مقدار زیادی به شکل پایه و سرعت آب بستگی دارد. در پایه‌هایی که به‌صورت آئرودینامیکی ساخته می‌شوند جداشدگی جریان و درنتیجه سطح گرداب شیاری کاهش‌یافته و قدرت سیستم گردابی ضعیف می‌شود. درنتیجه میزان آبشستگی موضعی به‌شدت کاهش می‌یابد. درحالی‌که در پایه‌های مستطیل شکل، میزان آبشستگی موضعی از همه بیشتر است، زیرا میزان سطح گرداب شیاری به علت افزایش جداشدگی خطوط جریان، زیاد می‌شود.

۲-۲-۳-سیستم گردابی دنباله‌دار

این سیستم فقط درجایی اتفاق می‌افتد که پایه مستغرق باشد. این سیستم از یک یا چند گرداب مجزا تشکیل‌شده است که از نوک پایه شروع‌شده و تا پایین ادامه می‌یابد. مکانیزم تشکیل این گرداب اختلاف فشار محدود بین دو سطح است، که در یک‌گوشه یکدیگر را قطع می‌کنند (نوک پایه).

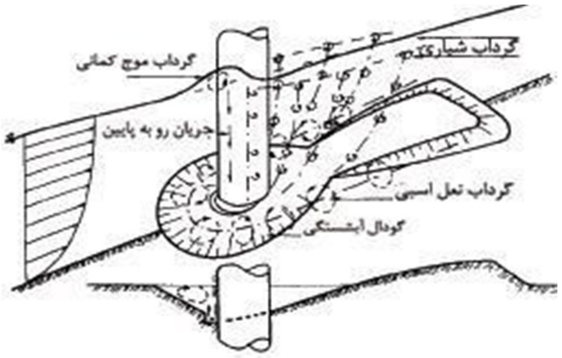
سرعت جریان آب بر روی سطح پایه استوانه‌ای در بالادست، در یک صفحه عمودی قرینه می‌شود و چون سرعت عادی جریان آب در آبراهه از سطح آب به کف آبراهه کاهش می‌یابد و به صفر می‌رسد فشار ایستایی نیز نسبت به عمق کاهش می‌یابد و چون گرادیان فشار به‌طرف پایین است، باعث ایجاد

جریان رو به پایین می‌شود. این جریان رو به پایین در هر ارتفاع و در همان صفحه قرینه، عمودی و برای هر عمق به‌خصوص از آبشستگی، یک توزیع سرعت دارد. این سرعت از صفر بر روی پایه و یا کمی دورتر از آن شروع و به یک مقدار ماکزیمم حدود ۴۵ درصد سرعت جریان در آبراهه است و هرچه عمق آبشستگی بیشتر شود این سرعت نیز افزایش می‌یابد تا به ۸۰ درصد سرعت عادی جریان در عمق آبشستگی (b=2.3 ds) برسد، که در آن ds و b به ترتیب عمق آبشستگی و عرض پایه است.

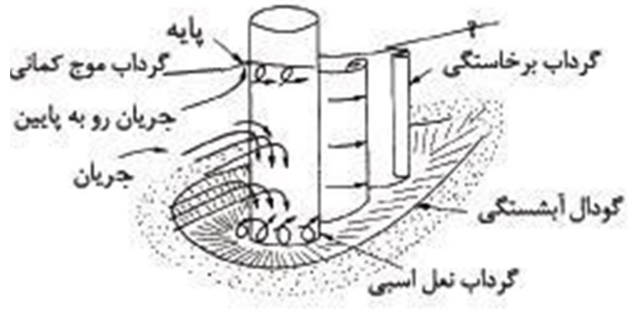
فشار ایستایی نه‌تنها موجب جریان رو به پایین می‌شود بلکه باعث افزایش شتاب جریان در طرفین پایه می‌شود. گسیختگی جریان در اطراف پایه باعث می‌شود که در محل اتصال با جریان اصلی آبراهه گرداب‌های دنباله‌دار ایجاد شود. سیستم گردابی دنباله‌دار به پایین‌دست منتقل‌شده و با سیستم نعل اسبی در کف آبراهه تداخل پیدا می‌کند. سیستم گردابی دنباله‌دار به‌صورت یک گرداب کوچک رسوبات را در کف آبراهه جدا می‌نماید.

۲-۲-۴-**سیستم موج کمانی**

سیستم موج‌کمانی در سطح آب تشکیل‌شده و جهت چرخش آن مخالف جهت چرخش جریان نعل- اسبی است. جریان موج‌کمانی در جریان‌های کم‌عمق اهمیت دارد زیرا درجایی که این سیستم گردابی با جریان اصلی هماهنگ شود برحسب کاهش قدرت سیستم رو به پایین می‌شود. اشکال زیر به‌خوبی توضیحات فوق را نمایش می‌دهند [۵].



شکل ۲-۱: الگوی جریان در اطراف پایه استوانه‌ای شکل [۵]



شکل ۲-۲: جریان رو به پایین و سیستم‌های گردابی اطراف پایه استوانه‌ای پل [۵]

۲-۳-الگوی جریان و مکانیزم آبشستگی اطراف گروه پایه‌ها

تعداد پایه پل‌ها و فاصله آن‌ها روی جریان حول آن، نحوه تشکیل گردابه‌ها و شکست آن‌ها در منطقه سکون و به‌تبع بر نیروهای وارد بر پایه‌ها و آبشستگی ایجادشده در اطراف آن‌ها اثرگذار است که متفاوت از پایه پل تکی است. در صورت کاربرد گروه پایه، مکانیسم‌های دیگری نیز در میزان آبشستگی مؤثر هستند. مکانیسم‌های مؤثر در آبشستگی گروه پایه عبارت‌اند از:

۲-۳-۱-اثر تقویت کردن

این عامل باعث افزایش عمق آبشستگی در پایه جلویی می‌شود. به علت وجود پایه پشتی، حفره‌های آبشستگی دو پایه ممکن است روی‌هم قرارگرفته و تراز بستر در پشت پایه جلویی پایین افتد. درنتیجه جریان به‌راحتی ذرات را از این حفره حرکت داده و حفره در جلو پایه عمیق‌تر شود. با افزایش فاصله پایه‌ها از یکدیگر، این اثر کاهش می‌یابد. هانا (۱۹۸۷) آبشستگی موضعی را در گروه شمع استوانه‌ای شکل با دو پایه تحت شرایط جریان دائمی یکنواخت و آبشستگی آب زلال بررسی کرد. وی مشاهده کرد که با افزایش فاصله بین پایه‌ها تأثیر عامل تقویت‌کننده کاهش و در حالتی که فاصله بین پایه‌ها ۲/۵ برابر قطر پایه‌ها باشد تأثیر عامل تقویت‌کننده ماکزیمم خواهد بود. وی مشاهده کرد که در گروه پایه‌های متقاطع با جهت جریان با افزایش فاصله بین پایه‌ها از تأثیر گرداب‌های نعل‌اسبی به هم فشرده‌شده کاسته می‌شود. ادیبان و همکاران نیز نتایج مشابهی برای گروه پایه دوتایی به دست

آوردند. آن‌ها در آزمایش‌های خود بیشترین تأثیر پدیده تقویت‌کننده را در حالتی که فاصله پایه‌ها دو برابر قطر پایه بود مشاهده کردند. آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش فاصله پایه‌ها، تأثیر پدیده-های مؤثر بر آبشستگی گروه پایه‌ها کاهش‌یافته و عمق آبشستگی در گروه پایه‌ها به عمق آبشستگی در تک‌پایه نزدیک می‌شود.

۲-۳-۲-اثر محافظت یا پناه دادن

پایه جلویی سبب کاهش سرعت مؤثر نزدیک شونده برای پایه عقبی می‌شود. این کاهش سرعت باعث کم شدن اثر گرداب نعل اسبی شده و درنتیجه آبشستگی در پایه پشتی کاهش می‌یابد. شکل دیگر اثر محافظت هنگامی اتفاق می‌افتد که مواد شسته شده از اطراف پایه جلویی در جلوی پایه عقبی جمع شوند. وایتال و همکاران (۱۹۹۴) تحقیقی در رابطه با آبشستگی گروه پایه‌ها انجام دادند. آنها گروه پایه را به‌عنوان تمهیدی جهت کاهش آبشستگی به کاربردند بدین ترتیب که به‌جای یک‌پایه استوانه‌ای با قطر بزرگ‌تر از سه‌پایه با قطر کوچک‌تر به‌طوری‌که دایره محیط بر این سه‌پایه هم‌قطر تک‌پایه باشد، استفاده کردند و مشاهده کردند که در بهترین حالت، گروه پایه‌ها توانستند عمق آبشستگی را ۴۰ درصد کاهش دهند [۶].

7گرداب‌های جاری

گرداب‌های جاری از پایه بالادست به سمت پایه‌های پایین‌دست حرکت می‌کنند، باوجود پایه دوم در مقابل این مسیر، گردابه‌ها به دلیل فشار منفی در مرکز خود به بلند کردن ذرات از حفره آبشستگی پایه‌های پایین‌دست کمک می‌کنند. پتانسیل آبشستگی گردابه‌های جاری، تابعی از اندازه سرعت انتقال آن‌ها و فاصله بین مسیر گردابه‌ها و پایه پایین‌دستی است.

۲-۳-۳-به هم فشردگی گردابه نعل اسبی

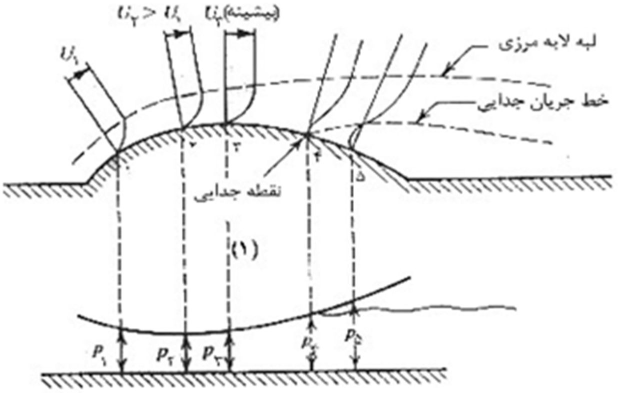
وقتی‌که چندپایه در برابر جریان واقع‌شده باشند، هرکدام از آن‌ها گردابه‌های نعل‌اسبی مخصوص خودشان را خواهند داشت. چنانچه فاصله بین پایه‌ها کاهش یابد، بازوهای داخلی گردابه‌های نعل‌اسبی به هم فشرده می‌شوند. این عامل باعث افزایش سرعت موضعی و درنتیجه افزایش عمق آبشستگی می‌شود.

۲-۴-جدایی و منطقه wake

یک سطح منحنی که در مسیر جریان یک سیال با سرعت U قرار داده‌شده مدنظر بگیرید که آن سطح جریان را منحرف می‌کند. در ناحیه باریک جریان سرعت افزایش می‌یابد. افزایش سرعت باعث کاهش فشار می‌شود فشار در تاج منحنی که سرعت بیشینه است به کمترین مقدار خود می‌رسد و بعدازآن دوباره فشار بالا می‌رود.(شکل زیر) گرادیان سرعت در نقاط ۱ و ۲ مثبت است. همچنین تا زمانی که فشار در حال کاهش است تأثیر بسزایی روی لایه‌مرزی دارد. ازاین‌رو رشد لایه‌مرزی در سطح منحنی در مقایسه با صفحه مسطح با گرادیان فشار صفر کندتر است. بعد از نقطه ۳ فشار در طول حرکت افزایش می‌یابد و درنتیجه با جریان مخالفت می‌کند و موجب می‌شود که حرکت ذرات سیال نزدیک سطح با یک وقفه مواجه شوند. بنابراین در نقطه ۴ گرادیان سرعت صفر می‌شود. در نقطه ۵ گرادیان جهت سرعت معکوس می‌شود. این بدان جهت است که جریان سیال نمی‌تواند در روی سطح ادامه پیدا کند و از آن جدا می‌شود. این پدیده که سیال قبل از آنکه به پایان سطح برسد از آن جدا می‌شود را ، پدیده جدایی [1] نامند.

---

[1] Separation



شکل ۲-۳: نمایش منطقه جدایی هنگام برخورد سیال با سطح منحنی

جدایی از جایی شروع می‌شود که گرادیان سرعت صفر باشد (dy/du =۰) و زمانی رخ می‌دهد که گرادیان فشار مثبت در سطح وجود داشته باشد. خطی که در طول مسیر جریان، نقاط صفر را به هم وصل می‌کند خط جریان جدایی[1] نامند.

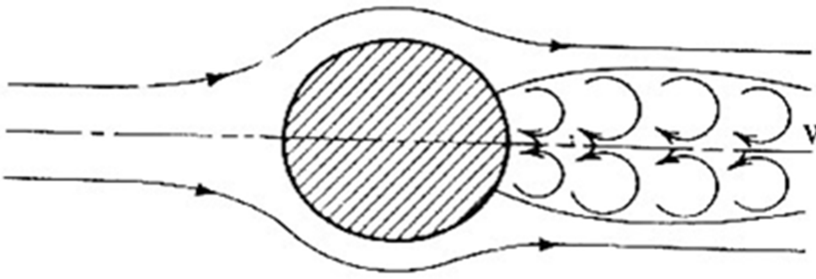
جدایی باعث می‌شود که گرداب‌های کوچکی در اثر کاهش انرژی به وجود آیند. این موضوع باعث می‌شود که فشار بعد از جدایی ثابت بماند و بیشتر نشود، تا جایی که دیگر جدایی نباشد. ناحیه پایین‌دست جدایی که گرداب‌های کوچک زیادی در آن وجود دارد و فشار نیز ثابت است را، ناحیه دنباله یا wake گویند. جدایی و wake در هر دو لایه‌مرزی متلاطم و ورقه‌ای می‌تواند اتفاق بیفتد. در لایه ورقه‌ای که سرعت‌پایین است امکان جدایی بیشتر از لایه‌مرزی متلاطم است.

۲-۵-جداشدگی خطوط جریان در اطراف پایه

بعد از مشخص شدن مفهوم جدایی و wake حال این موضوع در مورد پایه پل موردبررسی قرار می‌گیرد. هنگامی‌که آب به پایه پل برخورد می‌کند سرعت آن صفر می‌شود این نقطه را نقطه سکون می‌نامند. در نقطه سکون فشار بیشترین مقدار را دارد و هرچه از این نقطه دورتر شویم فشار کاهش‌یافته و سرعت افزایش پیدا می‌کند. از نقطه‌ای که سرعت کاهش می‌یابد آب به‌تدریج انرژی جنبشی خود را

[1] Separation Stream Line

از دست می‌دهد و دیگر قادر نیست برافزایش فشار غلبه کند و لذا یک جداشدگی در جریان ایجاد می‌شود. همانند شکل زیر نقطه‌ای که در آن جدایی آغاز می‌شود نقطه جداشدگی نامیده می‌شود و منطقه‌ای که در پشت پایه به وجود می‌آید همان منطقه wake است.



شکل ۲-۴: نمایش منطقه wake پشت پایه پل

جداشدگی باعث می‌شود که یک لایه‌مرزی جدید به وجود آید. برای یک جریان ورقه‌ای نقطه جداشدگی از کناره پایه شروع می‌شود لذا منطقه wake بزرگ است و فشار در این منطقه، منفی، ثابت و مساوی فشار در نقطه جدایی است. ولی اگر جریان متلاطم[۱] باشد، نقطه جدایی رو به پایین منتقل می‌شود و منطقه Wake کوچک می‌شود و لذا فشار در این منطقه کمی مثبت است بنابراین مقدار نیروی کششی[۲] برای جریان ورقه‌ای[۳] بزرگ‌تر از جریان متلاطم است و نیروی کششی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D . \rho . V^2 . A$$

$$(F_D)_{Turbulence} \approx \frac{1}{3} (F_D)_{laminar}$$

در این رابطه F_d نیروی کششی یا دراگ، C_d ضریب دراگ، ρ دانسیته سیال و V سرعت جریان می‌باشد. حداقل نیروی کششی بر روی یک استوانه زمانی اتفاق می‌افتد که لایه‌مرزی متلاطم باشد. به همین دلیل اگر سطح یک‌پایه زبر و ناصاف باشد، جریان متلاطم می‌شود و درنتیجه یک لایه‌مرزی

متلاطم در پشت پایه به وجود می‌آید و لذا نیروی کششی بر روی پایه کاهش می‌یابد و درنتیجه آبشستگی را کاهش می‌دهد.

۲-۶- پارامترهای مؤثر در پدیده آبشستگی

پارامترهای مؤثر بر آبشستگی را می‌توان به چهار گروه تقسیم کرد:

پارامترهای هندسی

۱- عرض پایه [b]: قطر پایه تأثیر مستقیم روی عمق آبشستگی دارد، زیرا که با افزایش قطر پایه، سرعت جریان عبوری بین پایه‌ها افزایش و درنتیجه عمق آبشستگی افزایش پیدا می‌کند.

۲- طول پایه [L]: عموماً طول پایه تأثیر محسوسی روی عمق آبشستگی ندارد. بخصوص اگر پایه‌ها موازی جریان باشند. ولی اگر پایه با زاویه‌ای نسبت به جریان قرارگرفته باشد، طول پایه تأثیر خیلی زیادی بر روی آبشستگی خواهد داشت.

۳- شکل پایه: شکل پایه تأثیر عمده‌ای روی آبشستگی دارد، به‌نحوی‌که یک‌پایه مربعی شکل، ماکزیمم عمق آبشستگی را دارد.

۴- زاویه محور پایه با جهت جریان (a)

۵- فاصله پایه‌ها

۶- سطح پایه

۷- سیستم حفاظتی پایه‌ها

۸- اجسام شناور که به‌وسیله جریان حمل می‌شود.

پارامترهای هیدرولیکی:

۱- عمق جریان در بالادست (y): عمق جریان تأثیر مستقیم روی آبشستگی دارد.

۲- سرعت متوسط جریان در بالادست (V): سرعت، آستانه آبشستگی را افزایش می‌دهد. سرعت بزرگ‌تر، عمق آبشستگی عمیق‌تر را به دنبال دارد. همچنین به‌احتمال‌زیاد عمق آبشستگی بستگی به نوع جریان نیز دارد. به‌طور مثال جین و فیشر نشان دادند که با افزایش عدد فرود عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.

۳- شیب آبراهه ($S_{\circ}$)

۴- دبی جریان در واحد عرض (q)

۵- سطح مقطع جریان

۶- ضریب زبری مانینگ

پارامترهای سیال:

۱- جرم واحد حجم سیال (r)

۲ - لزجت سینماتیکی (n)

۳- شتاب ثقل (g)

پارامترهای رسوب:

۱- جرم مخصوص مواد بستر (r_s)

۲- اندازه مواد رسوبی (D_{50})

۳- توزیع دانه بندی کف بستر

۴- شکل ذرات

۵- زاویه ایستایی (φ)

۶- چسبندگی خاک

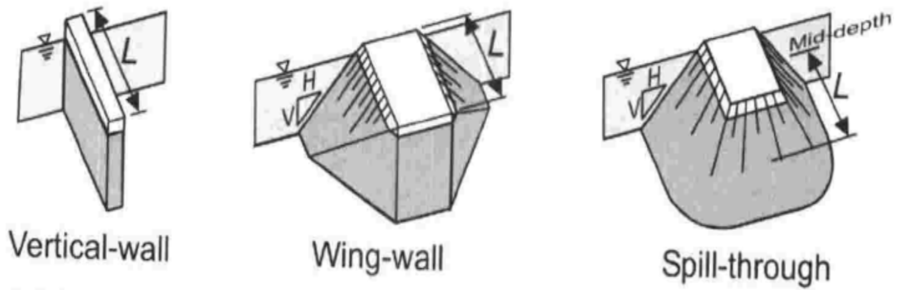
۷- طبقه‌بندی، لایه‌بندی و ترکیب مواد بستر

۸- تغییرات مصنوعی یا طبیعی در رژیم رسوبات

۲-۷- آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه‌های پل‌ها

ساخت تکیه‌گاه‌های پل و آب‌شکن‌ها اهداف متفاوتی دارد. اما به دلیل مشابه بودن شکل ظاهری و نیز تشابه مکانیزم آبشستگی اطراف تکیه‌گاه‌ها و آب‌شکن‌های بسته، آبشستگی اطراف این سازه‌ها باهم مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گیرند. بااین‌حال این سازه‌ها تفاوت‌هایی با یکدیگر داشته که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

تکیه‌گاه‌های پل یا کوله‌های پل، پایه‌های پل چسبیده به رودخانه می‌باشند. درحالی‌که آب‌شکن‌ها سازه‌هایی هستند که برای ساماندهی و تثبیت کناره‌های رودخانه احداث می‌شوند. تکیه‌گاه‌ها معمولاً بتنی هستند، درحالی‌که آب‌شکن‌ها بیشتر از مصالح رودخانه‌ای، توری سنگی و یا شمع کوبی ساخته می‌شوند. تکیه‌گاه‌ها معمولاً منفرد و در دو طرف رودخانه ساخته می‌شوند، اما آب‌شکن‌ها، بسته به هدف ساخت، در یک سمت رودخانه و یا در دو طرف رودخانه، به‌صورت ردیفی با طول‌ها و فواصل مختلف ساخته می‌شوند. در حالت کلی، تکیه‌گاه‌ها به تکیه‌گاه‌های خط جریانی و تکیه‌گاه‌های با دماغه تیز تقسیم می‌شوند. هندسه تکیه‌گاه‌ها به انواع مختلفی نظیر دیوار باله‌ای، دیوار شیب‌دار و دیوار قائم تقسیم می‌شوند. همچنین تکیه‌گاه‌ها از نظر موقعیت می‌توانند در سه حالت مختلف قرار گیرند، حالت اول مربوط به تکیه‌گاه در کانال اصلی است. حالت دوم، تکیه‌گاهی است که از سیلاب‌دشت شروع‌شده و تا داخل کانال اصلی ادامه پیدا می‌کند. حالت سوم، تکیه‌گاه در سیلاب‌دشت واقع‌شده که می‌تواند کاملاً در سیلاب‌دشت واقع شود و یا تا ابتدای کانال اصلی ادامه پیدا کند (مطابق شکل زیر). آب‌شکن‌ها نیز به آب‌شکن‌های بسته (نفوذناپذیر) و باز (نفوذپذیر) تقسیم‌بندی می‌شوند. هندسه آب‌شکن‌های بسته می‌تواند شبیه هندسه تکیه‌گاه‌ها باشد. اما معمولاً به علت استفاده از مصالح رودخانه‌ای برای ساخت این سازه‌ها، هندسه آن‌ها شبیه به تکیه‌گاه‌های با دیواره شیب‌دار خواهد بود [۷].



شکل ۲-۵: شکل‌های مختلف تکیه‌گاه

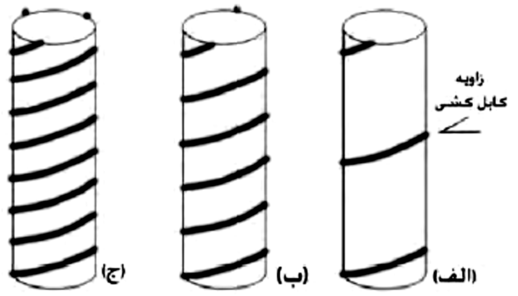
۲-۸-الگوی جریان و مکانیزم آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه‌های پل‌ها

مکانیزم آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه پل‌ها بسیار شبیه به مکانیزم آبشستگی در پایه پل‌ها است. تکیه‌گاه‌ها بخشی از مقطع رودخانه را محدود می‌کند و بر روی ساختار حرکتی جریان در مجاورت آن تأثیر فراوانی دارد. سرعت متوسط و بده در واحد عرض در محل سازه افزایش می‌یابد که باعث آشفتگی بیشتر جریان در اطراف سازه می‌شود. الگوی جریان در اطراف سازه و شکل‌گیری گردابه‌ها بر روی مصالح بستر دلایل اصلی آبشستگی موضعی در اطراف تکیه‌گاه‌های پل است [۸].

۲-۹- روش‌های غیرمستقیم کاهش آبشستگی

۲-۹-۱-بندکشی

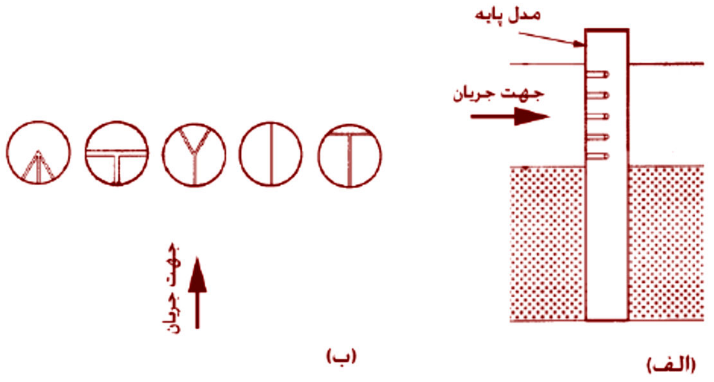
در این روش محیط پایه‌های پل، به‌صورت مارپیچ بندکشی (کابل‌کشی) می‌گردد (شکل زیر). شکل مارپیچ کابل‌ها باعث اثرگذاری و انحراف جریان پایین‌رونده شده و درنتیجه توان مخرب جریان گرداب نعل‌اسبی کاهش می‌یابد. راندمان این روش در کاهش میزان آبشستگی تابع عوامل متعددی ازجمله قطر کابل، زاویه بندکشی و تعداد ردیف‌های بندکشی (یک ردیفه، دو ردیفه و سه ردیفه) می‌باشد.
نتایج مطالعات گسترده توسط دی و همکاران (۲۰۰۶) نشان می‌دهد که با کاهش زاویه بندکشی نسبت به افق، افزایش نوارهای بندکشی و افزایش قطر کابل، راندمان این روش در کاهش عمق آبشستگی افزایش می‌یابد و با کاربرد این روش، آبشستگی تا ۴۶ درصد کاهش می‌یابد [۹].



شکل ۲-۶:بندکشی پایه پل. (الف): بندکشی یک ردیفه. (ب): دو ردیفه. (ج): سه ردیفه

۲-۹-۲-لوله‌های متصل

در این روش با ایجاد حفره در بدنه پایه یک سری لوله‌های مرتبط ایجاد می‌گردد (شکل زیر). ایجاد چنین لوله‌های مرتبطی باعث تغییر مسیر جریان در مجاورت پایه می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر بخشی از جریان پایین‌رونده (Downflow) که عامل اصلی ایجاد جریان گردابی نعل اسبی است، به همراه جریان عبوری به داخل لوله‌های مرتبط، از مسیر خود منحرف‌شده و درنتیجه سرعت جریان پایین‌رونده در مجاورت بستر تا حدودی کاهش می‌یابد. مطالعات گسترده انجام‌شده توسط عبدالرازک و همکاران (۲۰۰۳) نشان می‌دهد که عوامل متعددی بر راندمان کاهش عمق آبشستگی این روش اثر می‌گذارد که از آن جمله می‌توان به تعداد و قطر لوله‌ها، زاویه اتصال لوله‌ها و آرایش لوله‌ها اشاره نمود و حداکثر با استفاده از این روش، می‌توان تا ۳۹ درصد از عمق آبشستگی را کاهش داد [۱۰].



شکل ۲-۷: (الف): نمای جانبی. (ب):پاتن مقاطع لوله‌های اتصال در داخل پایه پل

۲-۹-۳-طوق

طوق عبارت است از صفحه‌ای نازک که در یک ارتفاع مشخص از پایه پل نصب‌شده و بدین‌وسیله مانع از تماس مستقیم جریان پایین‌رونده در جلو پل با بستر رودخانه و درنتیجه تضعیف توان گرداب نعل اسبی می‌گردد. طوق‌ها عموماً به شکل دایره‌ای هستند (شکل زیر). اگرچه تاکنون مطالعاتی نیز در خصوص طوق‌ها با اشکال مختلف (به‌عنوان‌مثال مستطیلی) صورت گرفته است.

مطالعات گسترده‌ای که توسط تاناکا و یانو (۱۹۶۷) صورت گرفت نشان می‌دهد که نصب یک طوق به پایه موجب کاهش قابل‌توجهی از میزان آبشستگی اطراف پایه می‌شود. در این خصوص عوامل متعددی بر میزان کاهش آبشستگی مؤثر می‌باشد که مهم‌ترین عوامل عبارت‌اند از: ابعاد (عرض و ضخامت)، شکل طوق (مستطیلی، دایره‌ای و...) و محل نصب طوق (نزدیک به سطح آب، نزدیک به بستر رودخانه و یا پایین‌تر از تراز اولیه بستر). مطالعات انجام‌شده توسط چیو (۱۹۹۲) و مونکادا و همکاران (۲۰۰۹) به همراه آزمایش‌های انجام‌شده توسط تاناکا و یانو(۱۹۶۷) به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش قطر طوق در طوق‌های دایره‌ای راندمان طوق در کاهش آبشستگی افزایش می‌یابد. در خصوص ضخامت طوق بنا به نظر درگاهی (۱۹۹۰) امکان کاهش راندمان طوق با افزایش ضخامت طوق وجود دارد. همچنین ارونقی و همکاران (۱۳۹۲) در یک پژوهش اثرات ضخامت طوق را در یک مدل فیزیکی موردبررسی قراردادند. نتایج نشان داد که با افزایش ضخامت طوق، کارایی آن کاهش می‌یابد. با تحلیل نتایج آزمایش‌های ضخامت طوق برای کارایی مناسب، حداکثر برابر با ۵ درصد قطر پایه پل پیشنهاد شد. با توجه به اینکه مطالعات انجام‌شده عمدتاً با استفاده از طوق‌های دایره‌ای انجام‌شده، اثر شکل طوق بر میزان کاهش آبشستگی نامشخص است. با کاهش فاصله طوق نسبت به بستر رودخانه، میزان آبشستگی کاهش می‌یابد. خزیمه‌نژاد و همکاران (۱۳۹۱) عملکرد طوقه‌های متقارن و نامتقارن را در کاهش آبشستگی موضعی پیرامون تکیه‌گاه پل موردبررسی قراردادند. نتایج آزمایش‌های نشان داد که با افزایش ابعاد هر دو نوع طوق بر عملکرد آن‌ها افزوده می‌شود. همچنین با مقایسه دو نوع طوقه مشخص شد که اگر عرض طوقه‌های نامتقارن در بالادست نسبت به عرض آن‌ها

در پایین‌دست تکیه‌گاه بزرگ‌تر باشد، نسبت به طوق متقارن هم مساحت خود از عملکرد بهتری برخوردار خواهد بود. علاوه بر این، برخی مطالعات (ایتما ۱۹۸۰) نیز نشان می‌دهد که طوق در تراز پایین‌تر از بستر اولیه، راندمان طوق را افزایش می‌دهد. خداشناس و همکاران (۱۳۸۸) عملکرد طوق از دو نوع طوق مربعی و دایره‌ای را در سه موقعیت بالای بستر، روی بستر و زیر بستر برای کاهش آبشستگی اطراف بستر در شرایط آزمایشگاهی بررسی نمود. نتایج حاصل از آزمایش‌های نشان داد، هرچه طوق عریض‌تر و ارتفاع آن روی پایه کمتر باشد عملکرد بهتری در کاهش آبشستگی دارد. طوق مربعی در کاهش آبشستگی مؤثرتر است به‌گونه‌ای که با عرض ۲.۵ برابر قطر پایه در زیر بستر باعث کاهش ۷۰ درصدی عمق آبشستگی شد. همچنین کرمی و همکاران (۱۳۹۱) عملکرد طوق کامل و تکه‌ای به‌عنوان محافظ بستر بر روی تکیه‌گاه مستطیلی بررسی نمودند. در تمامی آزمایش‌های از تکیه‌گاه کوتاه (نسبت طول تکیه‌گاه به عمق جریان کوچک‌تر مساوی یک) استفاده‌شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش طول طوق میزان آبشستگی کاهش می‌یابد و مهم‌ترین پارامترها مؤثر در کاهش عمق آبشستگی، طول طوق است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی در بهترین حالت، کاهش عمق آبشستگی کناره تکیه‌گاه مستطیلی (طوق در تراز پایین‌تر از بستر) برای طوق به طول ۲.۲۵L برابر ۸۷.۸ درصد است. علاوه بر عوامل فوق شرایط جریان نیز بر میزان راندمان طوق در کاهش عمق آبشستگی مؤثر می‌باشد. به‌عنوان‌مثال طوق‌ها در سرعت‌های پایین جریان آب از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشند دیفانتی و همکاران (۲۰۱۰). لذا بسته به ابعاد، محل نصب طوق و شرایط تاکنون راندمان‌های متعددی توسط محققین مختلف گزارش‌شده است. به‌عنوان‌مثال مطالعات تاناکا و یانو (۱۹۶۷) در به کار بردن یک طوق با قطری برابر با سه برابر قطر پایه پل در تراز بستر رودخانه نشان‌دهنده کاهش عمق آبشستگی برابر با ۲۲ درصد است. مطالعات مشاهیر و همکاران (۲۰۰۴) نیز با بکار بردن یک طوق با ابعاد نسبی مشابه و در موقعیت نسبی مشابه نسبت به بستر رودخانه حاکی از راندمان کاهش آبشستگی ۲۶ درصد است. عالم و همکاران (۱۳۹۱)، طوقی با عرض دو برابر عرض تکیه‌گاه را در شرایط آزمایشگاهی در سه ارتفاع مختلف: روی بستر، دو سانتی‌متری بالای بستر و چهار

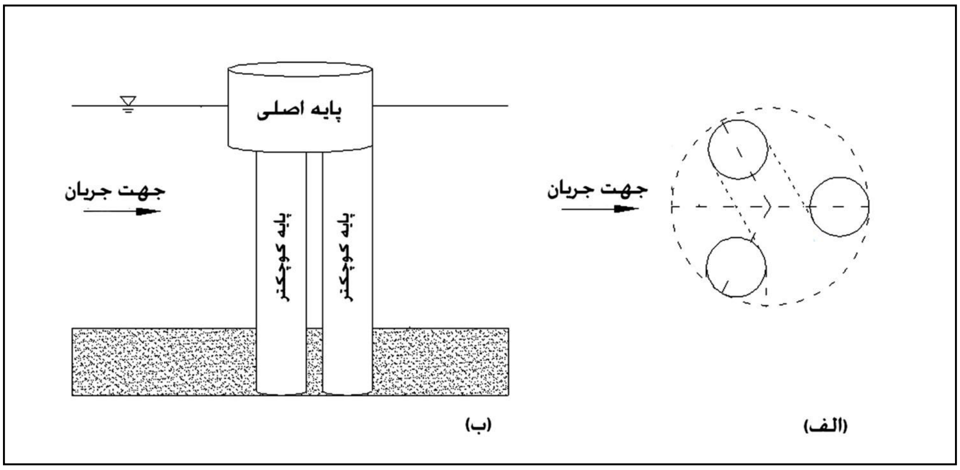
سانتی‌متری بالای ستر در شرایط آبشستگی آب زلال بررسی کرده و با تکیه‌گاه بدون طوق مقایسه نمود. نتایج نشان داد که طوق آبشستگی را کاهش داده و روی بستر عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد به‌طوری‌که حداکثر درصد آبشستگی ۹۴ درصد است. همچنین در مطالعات ارونقی و همکاران (۱۳۸۸) ابعاد مناسب طوق مستطیلی در بالادست و پایین‌دست که نسبت به بدنه پایه اندازه‌گیری می‌شدند را به ترتیب ۰.۹۲، ۱.۴۲ برابر قطر پایه تعیین شد. ضمن اینکه عرض مناسب طوق نیز سه برابر قطر پایه پل برآورد گردید. علیزاده وحید(۱۳۹۰) با انجام یک سری آزمایش‌های در شرایط آبشستگی آب زلال در شرایط مختلف هیدرولیکی(دبی و عمق) تکیه‌گاه همراه با طوق را بررسی نمودند. نتایج نشان داد تکیه‌گاه همراه با طوق در تراز زیر بستر بین ۱۹ تا ۳۲ درصد حداکثر عمق آبشستگی را نسبت به تکیه‌گاه قائم کاهش می‌دهد، درحالی‌که تکیه‌گاه با طوق در ترازبالای بستر بین ۶ تا ۲۶ درصد حداکثر عمق آبشستگی را کاهش می‌دهد. بنابراین طوق در ترازبالای بستر نقش منفی در کنترل آبشستگی دارد و باعث افزایش حداکثر عمق آبشستگی می‌شود. از طرف دیگر، نتایج مطالعات مونکادا و همکاران (۲۰۰۹) در استفاده از طوق کاملاً متفاوت بوده و نشان‌دهنده حذف کامل آبشستگی اطراف پایه است (راندمان ۱۰۰ درصد). در این خصوص لازم است مطالعات جامعی در خصوص راندمان طوق با ابعاد مختلف و در شرایط مختلف جریان صورت پذیرد [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵].

نصب یک طوق در اطراف پایه علاوه بر کاهش عمق آبشستگی، موجب کاهش نرخ فرسایش می‌گردد (مشاهیر و همکاران ۲۰۰۷). علاوه بر نصب یک طوق، مطالعات دیگری نیز در خصوص نصب چندین طوق بر روی یک‌پایه صورت گرفته است (ریچاردسون و یورک ۱۹۹۹). نتایج مطالعه مذکور نشان می‌دهد که نصب همزمان چندین طوق باعث مستهلک شدن انرژی جریان پایین‌رونده در جلو طوق شده و کاهش آبشستگی را به همراه خواهد داشت، لکن این امکان نیز وجود دارد که طوق‌هایی که بافاصله کم از یکدیگر نصب‌شده‌اند، همانند یک‌پایه با ابعاد بزرگ‌تر عمل کنند و باعث افزایش عمق آبشستگی گردند [۱۶].

طوق‌ها در کاهش آبشستگی پایه‌های مستطیل شکل مؤثرتر از پایه‌های دایره‌ای عمل می‌کنند (زراتی و همکاران ۲۰۰۴) علاوه براین، مطالعات انجام‌شده بر روی پایه‌های پشت سر هم نشان می‌دهد که طوق‌های نصب‌شده بر پایه‌های عقبی مؤثرتر از پایه‌های جلویی عمل می‌کنند (حیدرپور و افضلی مهر ۲۰۰۵). مطالعات زراتی و همکاران (۲۰۰۶) بر روی نصب طوق بر روی پایه‌های پشت سر هم نشان می‌دهد که طوق‌ها در این شرایط مؤثرتر از وضعیتی عمل می‌کنند که پایه‌ها دارای آرایش عمود بر جریان رودخانه می‌باشند [۱۷].

۲-۹-۴-**گروه پایه‌ها**

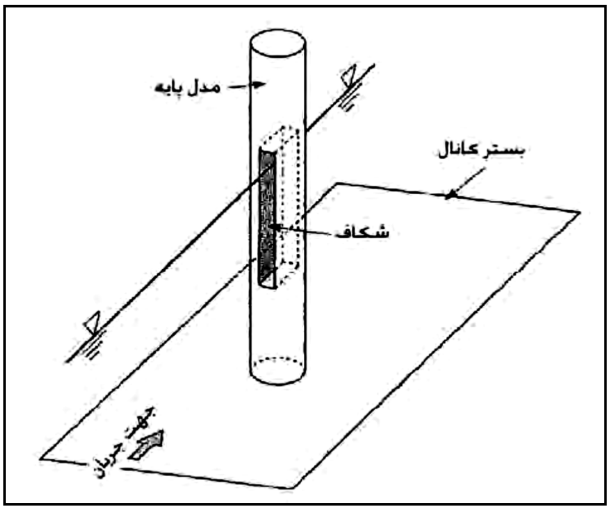
در این روش، بخشی از پایه پل، با گروهی از پایه‌های کوچک‌تر جایگزین می‌گردد. به‌عنوان‌مثال شکل زیر نشان می‌دهد که قسمت نزدیک به بستر پایه اصلی با یک گروه متشکل از سه‌پایه کوچک‌تر جایگزین شده است. در این روش بخشی از جریان آب از میان گروه پایه‌ها گذشته و باعث تغییر مسیر جریان پایین‌رونده در جلو پایه می‌گردد. به‌طورکلی بسته به طول پایه‌ها نسبت به عمق جریان آب، تعداد پایه‌ها، میزان بازشدگی پایه‌ها، راندمان این روش متغیر است. در مطالعات صورت گرفته توسط ویتال و همکاران (۱۹۹۴) ، راندمان حدود ۳۹ درصد در بهترین ترکیب با استفاده از یک گروه متشکل از سه‌پایه به‌دست‌آمده است [۱۸].



شکل ۲-۸: گروه سه‌پایه جهت کاهش آبشستگی. (الف):پلان از مقطع گروه پایه‌ها. (ب):نمای جانبی

۲-۹-۵-شکاف

ایجاد یک شکاف در داخل پل باعث انتقال بخشی از جریان به سمت داخل شکاف می‌گردد. جریان انتقالی همانند یک جت آب عمل کرده و باعث انحراف بخشی از جریان پایین‌رونده در جلو پایه شده و درنتیجه موجب تضعیف اثر مخرب گرداب نعل اسبی در مجاورت پایه می‌گردد. شکل زیر نشان‌دهنده یک شکاف بر روی پایه پل است.



شکل ۲-۹: کاربرد شکاف به‌منظور کاهش آبشستگی

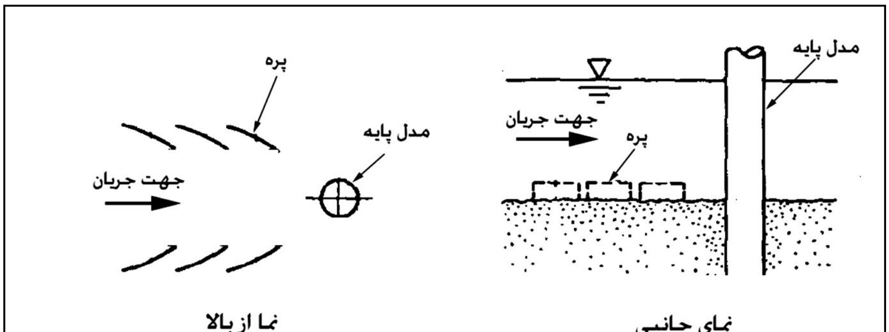
در این خصوص مطالعات جامعی صورت گرفته که نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه عمق آبشستگی است و در عمده موارد راندمان کاهش آبشستگی این روش حدود ۳۰ درصد گزارش‌شده است. (تاناکا و یانو ۱۹۶۷، چیو ۱۹۹۲، کومار و همکاران ۱۹۹۹، حیدرپور و همکاران ۲۰۰۳) [۱۹].

راندمان یک شکاف بر میزان کاهش آبشستگی تابع عوامل متعددی از جمله ابعاد شکاف و موقعیت شکاف نسبت به بستر رودخانه است. با افزایش ابعاد شکاف (طول و عرض)، راندمان شکاف افزایش پیدا می‌کند. در خصوص موقعیت شکاف، نیز با نزدیکی شکاف به بستر رودخانه، راندمان شکاف افزایش‌یافته، به‌ویژه زمانی که بخشی از شکاف در تراز پایین‌تر از بستر اولیه تعبیه گردد. (تاناکا و یانو ۱۹۶۷، چیو ۱۹۹۲) [۲۰].

تعبیه شکاف بر روی گروه‌های متشکل از ۲ و ۳ پایه نیز موجب کاهش عمق آب شستگی می‌گردد و راندمان شکاف در این وضعیت تابع فاصله پایه‌ها از یکدیگر بوده و با افزایش فاصله پایه‌ها، راندمان شکاف‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند.

۲-۹-۶-صفحات منحرف‌کننده جریان

صفحات منحرف‌کننده جریان، به‌صورت پره‌های کوچک نزدیک به بستر و یا به شکل پانل‌های بزرگ در مسیر رودخانه و در بالادست پایه پل قابل‌نصب می‌باشند. استفاده از پره‌ها به‌طورکلی به‌منظور ساماندهی رودخانه‌ها پیشنهادشده و مورداستفاده قرار می‌گیرد. این روش همچنین به‌منظور کاهش آبشستگی پایه‌های پل‌ها می‌تواند در نظر گرفته شود.(شکل زیر). مهم‌ترین پارامترهایی که در خصوص عملکرد این روش مؤثر می‌باشند عبارت‌اند از ارتفاع پره نسبت به تراز اولیه، طول بستر رودخانه، طول پره‌ها، فاصله دورترین پره نسبت به پایه پل، زاویه پره نسبت به جهت جریان، فاصله جانبی پره‌ها و فاصله بین ردیف‌های پره. بصیرت و همکاران (۱۳۸۸) در یک آزمایش استفاده از صفحات منحرف‌کننده جریان در سه طول، در ۵ فاصله مختلف از تکیه‌گاه میزان آبشستگی ایجادشده در دماغه تکیه‌گاه را بررسی نمودند. مشاهده شد با افزایش فاصله پانل‌ها مقدار آبشستگی افزایش پیدا می‌کند. همچنین افزایش طول پانل‌ها منجر به کاهش عمق آبشستگی می‌شود [۲۱].

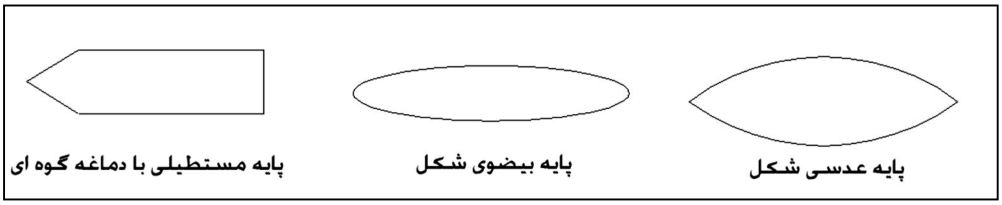


شکل ۲-۱۰: کاربرد پره‌های منحرف‌کننده مسیر جریان به‌منظور کاهش آبشستگی

۲-۹-۷-تغییر شکل پایه

با تغییر شکل پایه نیز می‌توان آبشستگی را تا حدودی کنترل نمود. منظور از تغییر شکل، عمدتاً تغییر دماغه و طول و انتهای پایه می‌باشد. شکل دماغه پایه تأثیر قابل‌توجهی در آبشستگی دارد. دماغه‌های پخ که غالباً به شکل مستطیل بکار می‌روند. بخش قابل‌توجهی از جریان به سمت پایه را به سمت پایین منحرف نموده و جریان پایین‌رونده درنتیجه جریان گرداب نعل اسبی شدیدتری نسبت به پایه-های نوک‌تیز ایجاد می‌کنند.

تغییر شکل پایه‌های ساخته‌شده با دشواری همراه بوده و در این خصوص لازم است تمهیدات لازم در هنگام طرحی و ساخت پایه‌ها در نظر گرفته شود. در این خصوص، مطالعات گسترده‌ای توسط چابرت و انگلدینجر (۱۹۵۶)، تایسون (۱۹۴۰)، دیتز (۱۹۷۲) و غیره صورت گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که با تغییر شکل امکان کاهش عمق آبشستگی تا حدود ۳۰ درصد است. نکته قابل‌توجه در این خصوص، طول پایه است. زیرا که مطالعات گذشته نشان می‌دهد که نسبت طول به عرض پایه می‌تواند در عمق آبشستگی مؤثر باشد. سه شکل از پایه‌ها که می‌توانند باعث کاهش چشمگیر آبشستگی گردند عبارت‌اند از: پایه مستطیلی با دماغه گوه‌ای، پایه عدسی و پایه بیضوی شکل. این سه‌پایه در شکل زیر نشان داده‌شده است [۲۲].

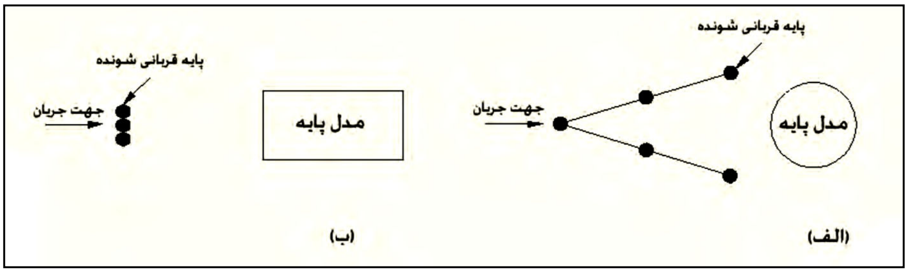


شکل ۲-۱۱: انواع اشکال پایه‌های مؤثر در کاهش آبشستگی

۲-۹-۸-پایه‌های قربانی شونده

در این روش با قرار دادن پایه‌های کوچک‌تر در مسیر جریان و در قسمت بالادست پایه اصلی، مسیر جریان به سمت پایه تا حدودی منحرف‌شده و درنتیجه سرعت جریان پایین‌رونده در جلو پایه نیز کاهش می‌یابد. کاهش سرعت و درنتیجه توان جریان پایین‌رونده، کاهش قدرت جریان گردابی و

کاهش عمق آبشستگی را به دنبال خواهد داشت. به‌عبارت‌دیگر پایه‌های قربانی شونده اگرچه خود دچار آبشستگی قرار می‌گیرند، آبشستگی پایه اصلی را تا حدود قابل‌توجهی مهار می‌کنند. لذا با توجه به وقوع آبشستگی در این پایه‌ها، لازم است که این پایه‌ها تا عمق قابل‌توجهی در بستر رودخانه کوبیده شوند. علاوه بر تغییر مسیر جریان توسط پایه‌های قربانی شونده، مواد بستر حاصل از فرسایش در فونداسیون این پایه‌ها نیز در اطراف پایه اصلی جمع می‌گردند و به کاهش عمق آبشستگی کمک می‌کنند. در شکل ۳-۸ الف، نمونه‌ای از پایه‌های قربانی شونده با آرایش مثلثی و در قسمت ب آرایش عمودی بر مسیر جریان نشان داده‌شده است. پیرایش(۱۳۹۰) با انجام یک دسته آزمایش‌های با تغییر در فاصله پایه‌های قربانی شونده در بالادست تکیه‌گاه برای بررسی تأثیر فاصله پایه‌های قربانی شونده از نظر کاهش حجم و عمق آبشستگی بر تکیه‌گاه به این نتیجه رسیدند که با استفاده از پایه‌های قربانی شونده حجم آبشستگی از ۲۳ تا ۴۸ درصد و همچنین کاهش ماکزیمم عمق آبشستگی از ۳۹ تا۶۴ درصد را دارد که ماکزیمم اعداد مربوط به فاصله ۲L پایه‌های قربانی شونده از تکیه‌گاه و مینیمم اعداد مربوط به فاصله ۱.۵L است و این نشان‌دهنده این است که پایه‌های قربانی شونده در فواصل نزدیک به تکیه‌گاه به دلیل قرارگیری در میدان اثر گردابه‌های تکیه‌گاه قابلیت کمتری در کاهش حجم و عمق آبشستگی دارند و هرچه فاصله قرارگیری پایه‌ها از تکیه‌گاه دورتر شود (تا فاصله ۲L) به علت آنکه جریان پس از پایه‌ها یکنواخت‌تر به تکیه‌گاه‌ها می‌رسد، تأثیر بیشتری در کاهش حجم و عمق آبشستگی دارد. پس‌ازاین فاصله یا بیشتر شدن فاصله، جریان عبوری از پایه‌ها تمایل به نزدیک شدن به تکیه‌گاه را داشته و درنتیجه با شدت بیشتری آبشستگی ادامه می‌یابد [۲۳].



شکل ۲-۱۲: الف) آرایش مثلثی. ب)آرایش عمود بر مسیر جریان پایه‌های قربانی شونده

۲-۹-۹-دندانه‌ها و پمپاژ جریان

ساخت دندانه‌ها در بالادست و در پایین‌دست پایه‌های پل، باعث کاهش زیادی در کاهش آبشستگی خواهد شد. راندمان این روش در کاهش آبشستگی به موقعیت دندانه‌ها نسبت به پایه، عرض دندانه، ارتفاع دندانه نسبت به سطح تراز اولیه بستر بستگی دارد. نتایج تحقیق توسط چیو و لیم نشان می‌دهد که در بهترین آرایش، زمانی که فاصله دندانه از پایه برابر با ۴.۴ عرض پایه است و عمق آب کمتر از سه برابر ارتفاع دندانه از بستر رودخانه است، امکان کاهش عمق آبشستگی تا سقف ۴۱ درصد است. لکن با افزایش سرعت جریان نسبت به‌سرعت موردنیاز جهت حمل رسوبات، راندمان مذکور کاهش می‌یابد.

در این روش با ایجاد چندین سوراخ در قسمت انتهایی پایه در مجاورت بستر امکان انتقال جریان به داخل پایه فراهم می‌گردد. سپس با ایجاد پمپاژ، الگوی جریان در اطراف بستر و پایه تغییر کرده و درنتیجه گرداب‌های نعل اسبی و گرداب دنباله با توان کمتری تشکیل می‌گردد. در این خصوص، مطالعه انجام‌شده توسط رونی و ماچمهل (۱۹۷۷) نشان می‌دهد که با استفاده از این روش می‌توان آبشستگی را به‌طور کامل کنترل نمود.

۲-۱۰- روش‌های حفاظت مستقیم

حفاظت مستقیم به اقداماتی گفته می‌شود که مستقیماً روی کناره رودخانه انجام می‌گیرد تا مانع از فرسایش و تخریب آن توسط جریان آب، اثر موج و غیره گردد. از طریق حفاظت مستقیم، درواقع سطح خاک فرسایش پذیر در برابر نیروهای جریان تقویت می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- دیوارهای وزنی
- دیوارهای وزنی توری سنگی
- دیوارهای شمعی

- دیوارهای شمعی طره‌ای
- دیوارهای شمعی مهاربندی‌شده
- واحدهای پیش‌ساخته بتنی
- خاک مسلح
- ژئوتکستایل‌های نگه‌دارنده
- لاستیک‌های فرسوده خودرو

۲-۱۱- مروری بر مطالعات گذشته

در پدیده آبشستگی پایه پل‌ها پارامترهای زیادی مؤثر هستند و محققان زیادی با این پارامترها، با توجه به داده‌های آزمایشگاهی یا صحرایی و مطالعات گسترده در خصوص مکانیزم آبشستگی، روابطی برای تخمین و پیش‌بینی عمق آبشستگی ارائه داده‌اند، که در ادامه این بخش به آنها اشاره خواهد شد. در این مطالعه سعی گردیده است به مهم‌ترین مطالعات در زمینه آبشستگی پایه پل‌ها پرداخته شود.

۲-۱۱-۱- مطالعات اینگلیس پونا ۱۹۴۹

آزمایش‌های متعددی در مرکز ایستگاه تحقیقاتی آب و برق در poona کشور هندوستان در سال‌های ۱۹۳۸ و ۱۹۳۹ برای مطالعات آبشستگی اطراف تک‌پایه پل، انجام شد. این مطالعات که در یک فلوم که در آن ماسه با قطر متوسط ذرات ۲۹ میلی‌متر ریخته شده بود، انجام گرفت. نتایج و اطلاعات این آزمایش‌های، اساس کار اینگلیس (۱۹۴۹) رابطه‌ای شد که به نام رابطه (Inglis _ poona) معروف گردید. این رابطه چنین است:

$$d_s = 1.7b\left(\frac{q^{\frac{2}{3}}}{b}\right) - y$$

که در آن:

d_s: عمق آبشستگی نسبت به تراز کف بستر

b : قطر یا عرض پایه

y: عمق آب در بالادست پایه

q:دبی در واحد عرض

معادله فوق از نظر ابعادی همگن نیست،بنابراین احتمال اینکه در مورد داده‌های آبشستگی پل‌های دیگر کاربرد داشته باشد کم است.

اینگلیس با استفاده از همان داده‌های آزمایشگاهی، معادله دیگری که از نظر ابعادی همگن بوده ارائه کرد. این معادله (Inglis _ poona) معروف است

$$d_s = 1.73b\left(\frac{y}{b}\right)^{0.78} - y$$

پارامترهای موجود در این رابطه، همان‌هایی هستند که در بالا تعریف‌شده‌اند [۲۴].

۲-۱۱-۲- لارسن و تاچ (۱۹۵۶)

این دو محقق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده رابطه زیر را پیشنهاد دادند [۲۵]:

$$\frac{d_s}{b} = 1.5\left(\frac{y}{b}\right)^{0.3}$$

که در آن:

ds: عمق آبشستگی نسبت به تراز کف بستر (m)،

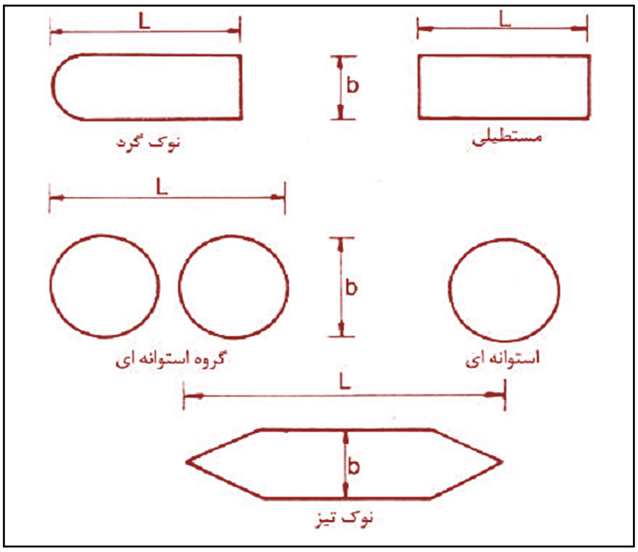
y: عمق جریان در بالادست پایه(m)و

b: عرض پایه (m).

۲-۱۱-۳- لی و همکاران (۱۹۶۱)

بر اساس مطالعات لی و همکارانش، شکل پایه فاکتور مهمی است که بر روی عمق آبشستگی تأثیر بسزایی دارد. زیرا گرداب نعل اسبی به شکل پایه بستگی دارد. پایه مستطیلی شکل بیشترین عمق

آبشستگی را ایجاد می‌کند. ساختن شکل پایه که مطابق خطوط جریان باشد و درنتیجه از عمل جداشدگی جریان بکاهد، تأثیر مهمی در کاهش عمق، آبشستگی دارد، به‌نحوی‌که اگر شکل پایه با خطوط جریان موازی باشد، قدرت گرداب نعل اسبی به‌شدت کاهش می‌یابد و آبشستگی کمتری اتفاق می‌افتد. درهرحال اگر جلوی پایه آئرودینامیکی باشد، قدرت گرداب نعل اسبی کاهش می‌یابد. ولی اگر پایین‌دست پایه آئرودینامیکی باشد، قدرت گردابی کاهش خواهد یافت. در شکل زیر حالت‌های مختلف پایه نشان داده‌شده است.



شکل ۲-۱۳: حالت‌های مختلف شکل‌های پایه پل

برای پایه‌های مستطیلی $$\frac{d_s}{y} = 2.15\left(\frac{b}{y}\right)^{\frac{2}{3}}.(Fr)^{\frac{1}{3}}$$

برای پایه‌های دایره‌ای $$\frac{d_s}{y} = 2.0\left(\frac{b}{y}\right)^{\frac{2}{5}}.(Fr)^{\frac{2}{3}}$$

که در آن:

d_s: عمق تعادل آبشستگی موضعی (m)،

y: عمق جریان در بالادست پایه (m)،

b: عرض پایه (m)،

Fr: عدد فرود در بالادست پایه (m) و

V: سرعت جریان در بالادست پایه $\left(\frac{m}{s}\right)$،

هرچه شکل پایه از خطوط جریان تبعیت بیشتری داشته باشد، آبشستگی در کنار آن پایه، بیشتر کاهش می‌یابد. چنانچه شکل پایه غیر از مستطیل باشد، در آن صورت مقدار آبشستگی از رابطه پایه-های مستطیلی، در ضریبی که از جدول زیر به دست می‌آید، ضرب می‌شود.

جدول ۲-۱: مقدار ضریب اصلاحی برای پایه‌های پل

نسبت عمق آبشستگی به پایه مستطیلی	شکل پایه
۱/۰	مستطیلی
۰/۹	استوانه ای
۰/۹	نوک گرد
۰/۹	گروه استوانه ای
۰/۸	نوک تیز

چنانچه طول پایه به‌موازات جریان آب قرار داشته باشد ($\alpha = 0$)، عمق آبشستگی حداقل خواهد بود. با افزایش زاویه محور پایه نسبت به خط جریان، عمق آبشستگی افزایش خواهد یافت. در مورد یک‌پایه دایره‌ای شکل، جهت، تأثیری بر روی آبشستگی ندارد. اما اگر به‌جای یک‌پایه، چندین پایه در امتداد هم باشند، جهت جریان با توجه به زاویه‌ای که با محور پایه‌ها می‌سازد، در ازدیاد عمق آبشستگی نقش بسزایی خواهد داشت [۲۶].

۲-۱۱-۴- شن-مازا (۱۹۶۹)

این دو محقق در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که نسبت عمق آبشستگی به عرض پایه با عدد فرود پایه ارتباط دارد. شن در سال (۱۹۶۹) تحقیقات خود را بر روی‌داده‌های موجود با ذرات به قطر متوسط کمتر از ۰/۵۲ میلی‌متر آغاز کرد و در مورد تأثیر عدد فرود بر آبشستگی تحقیق کرد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که برای عدد فرود پایه کمتر از ۰/۲ و ماسه خوب دانه‌بندی شده، عمق آبشستگی به‌سرعت با افزایش عدد فرود پایه، افزایش می‌یابد. رابطه به شرح زیر است:

$$d_s = 11.obF_p^2 \qquad \text{برای} \qquad F_p < 0.2$$

$$d_s = 3.4bF_p{}^{0.67} \qquad \text{برای} \qquad F_b > 0.2$$

که در این رابطه $F_p = \frac{V}{\sqrt{gb}}$ است [۲۷].

۲-۱۱-۵- روش دانشگاه ایالتی کلرادو(۱۹۷۵) -(CSU)

مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای توسط ریچاردسون و همکارانش در دانشگاه ایالتی کلرادو انجام گردید. رابطه کلی زیر از نتایج مطالعات ریچاردسون است [۲۸]:

$$\frac{d_s}{y} = 2.0 k_1 k_2 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} . (Fr)^{0.43}$$

که برای پایه‌های مستطیلی:

$$\frac{d_s}{y} = 2.2 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} . (Fr)^{0.43}$$

و برای پایه‌های استوانه‌ای:

$$\frac{d_s}{y} = 2.0 \left(\frac{D}{y}\right)^{0.65} . (Fr)^{0.43}$$

که در آنها:

D و b: عرض و قطر پایه(m)،

y: عمق جریان آب(m)،

V: سرعت جریان $\left(\frac{m}{s}\right)$،

d_s: عمق آبشستگی(m)،

k_1: ضریب مربوط به زاویه برخورد جریان و

k_2: ضریب شکل مربوط به شکل پایه می‌باشد.

۲-۱۱-۶- ریچاردسون(۱۹۹۱) -HEC18

این محقق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بر روی پایه‌های استوانه‌ای، به رابطه زیر دست‌یافت:

$$\frac{d_s}{y} = 2.0 k_1 k_2 k_3 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} . (Fr)^{0.43}$$

k_1: ضریبی است که به شکل نوک پایه بستگی دارد (برای پایه‌های با نوک چهارگوش ۱/۱، برای پایه-های استوانه‌ای یا نوک‌گرد ۱/۰، برای پایه‌های با نوک‌تیز ۰/۹ و برای گروه پایه‌ها ۱/۰).

k_2: ضریبی است که به نسبت طول پایه به عرض پایه و زاویه نزدیک شدن جریان به پایه پل بستگی دارد، و از جدول زیر به دست می‌آید [۲۹].

جدول ۲-۲: ضریب k2 با توجه به زاویه هجوم آب و نسبت طول به عرض پایه پل

زاویه(درجه)	$\frac{1}{b}=4$	$\frac{1}{b}=8$	$\frac{1}{b}=12$
۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰
۱۵	۱/۵	۲/۰	۲/۵
۳۰	۲/۰	۲/۷۵	۳/۵
۴۵	۲/۳	۳/۳	۴/۳
۹۰	۲/۵	۳/۹	۵/۰

k_3: ضریبی است که به وضعیت بستر مربوط است و از جدول زیر به دست می‌آید.

جدول ۲-۳: ضریب k3 وضعیت بستر

وضعیت بستر	ارتفاع خاکریز	K_3
آبشستگی آب زلال	-	۱/۱
بستر مسطح	-	۱/۱
خاکریز کوچک	۲ تا ۱۰ فوت	۱/۱
خاکریز متوسط	۱۰ تا ۳۰ فوت	۱/۱-۱/۲
خاکریز بزرگ	بیشتر از ۳۰ فوت	۱/۳

۲-۱۱-۷- وله و باچ (۱۹۹۹)

این دو محقق با استفاده از آمار ۲۰ پل در نیویورک به معادله زیر دست‌یافتند:

$$d_s = 6.21 * 10^{-7}.\frac{P}{D_{84}} - 0.0$$

و

$$P = \rho.y.W.V^2$$

که در این معادلات:

d_s: عمق آبشستگی(m)،

D_{84}: قطری است که ۸۴ درصد ذرات از آن کوچک‌تر می‌باشند،

ρ: چگالی آب $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ که به توصیه این دو محقق ۱۰۰۰ در نظر گرفته‌شده است و

W: عرض جریان(m).

۲-۱۱-۸- رابطه دانشگاه ایالتی کلرادو (۲۰۰۱)

این معادله شکل اصلاح‌شده معادله‌ی زیر می‌باشد و توسط ریچاردسون و دیویس ارائه شد و به رابطه CSU اصلاح‌شده معروف است. این معادله به‌صورت زیر است:

$$\frac{d_s}{y} = 2.0 k_I . k_2 . k_3 . k_4 . k_W \left(\frac{b}{y}\right)^{0.65} . (Fr)^{0.43}$$

که در آن:

d_s: عمق آبشستگی(m)،

y: عمق جریان در بالادست پایه(m)،

k_1: ضریب شکل پایه است که در معادله ریچاردسون ۱۹۹۱ در مورد آن توضیح داده‌شده است.

k_2: ضریبی است که به زاویه هجوم آب به پایه پل بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$k_2 = \left(\cos\alpha + \frac{1}{b}\sin\alpha\right)^{0.65}$$

برای محاسبه k_2 از جدول (۷-۴) نیز می‌توان استفاده کرد. اگر $\frac{1}{b}$ بزرگ‌تر از ۱۲ شد، همان $\frac{1}{b} = 12$ در نظر گرفته می‌شود و برای زوایای کمتر از 5^0 درجه $k_2=1$ است.

k_3: ضریبی است که به وضعیت بستر بستگی دارد و از جدول ارائه‌شده در بخش قبل تعیین می‌شود.

k_4: ضریبی است که هنگام تشکیل لایه محافظ بر روی حفره آبشستگی استفاده می‌شود و از رابطه زیر قابل‌محاسبه است:

$$k_4 = 0.4(v_R)^{0.15}$$

که:

$$V_R = \frac{V - V_{ic(D_{50})}}{V_{c(D_{50})} - V_{ic(D_{95})}}$$

$$V_{ic(D_n)} = 0.645 \left(\frac{D_n}{b}\right)^{0.053} . V_{c(D_n)}$$

و

$$V_{c(D_n)} = C. y^{\frac{1}{6}}. D^{\frac{1}{3}}$$

که در رابطه فوق، c=۶/۱۹ در سیستم SI و c=۱۱/۱۷ در سیستم انگلیسی است.

البته اگر $D_{50} < 2mm$ یا $D_{95} < 20mm$ آنگاه ($k_4=1$) در غیر این صورت از رابطه فوق برای محاسبه k_4 استفاده می‌شود.

K_w: ضریبی است که برای پایه‌های عریض در آب‌های کم‌عمق استفاده می‌شود. از این ضریب زمانی استفاده می‌شود که $\left(\frac{y}{b} < 0.8\right)$ باشد به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۳۰]:

$$k_w = 2.58 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.34} . (Fr)^{0.65} \qquad \text{برای} \qquad \frac{V}{V_c} < 1$$

$$k_w = 1.0 \left(\frac{y}{b}\right) . (Fr)^{0.25} \qquad \text{برای} \qquad \frac{V}{V_c} \geq 1$$

همچنین در این معادلات:

B: عرض پایه (*m*)،

L: طول پایه (*m*)،

Fr: عدد فرود بالادست پایه،

V: سرعت جریان در بالادست پایه $\left(\frac{m}{s}\right)$.

۲-۱۱-۹- تامر (۲۰۰۵)

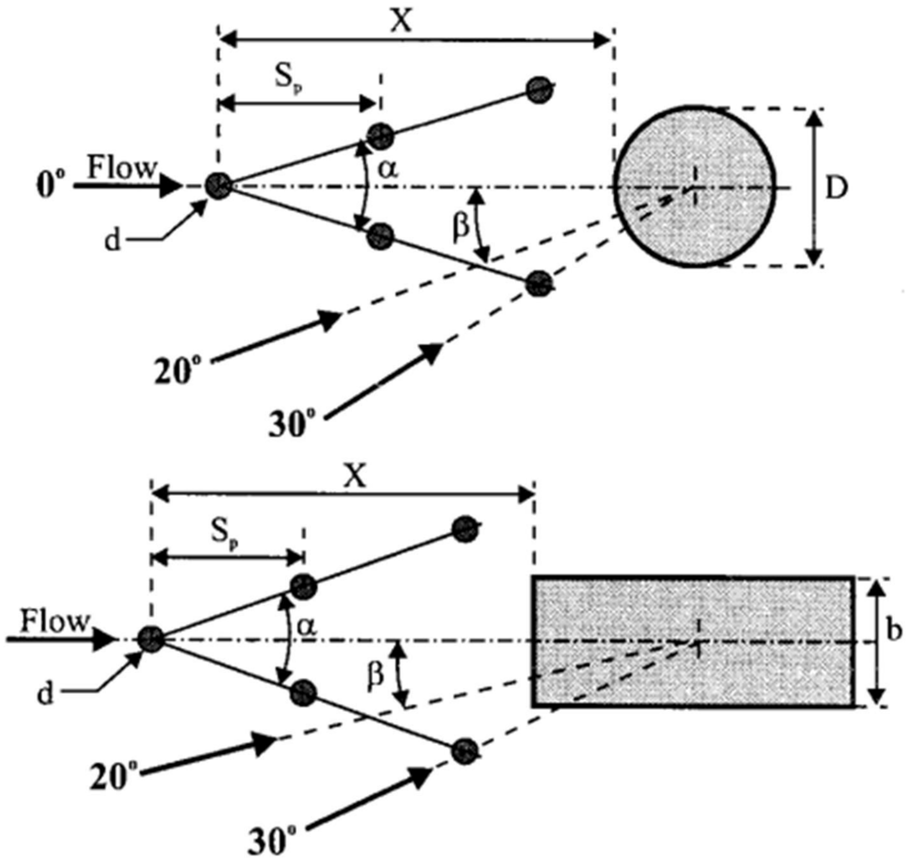
این محقق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و صحرائی، معادلات CSU (۱۹۷۵)، ملویل و ساترلند (۱۹۸۸)، جین و فیشر (۱۹۷۹) و لارسن و تاچ (۱۹۵۶) را مورد مقایسه قرار داده است و به این نتیجه رسیده که معادلات CSU و لارسن و تاچ از دقت خوبی برخوردار هستند و دو معادله دیگر از دقت کمتری برخوردار هستند [۳۱].

۲-۱۱-۱۰- شریعت رضوی و همکاران۱۳۹۱

در این تحقیق با بهره‌گیری از نرم‌افزار flow3D، الگوی جریان و انتقال بار بستر به‌صورت غیر متوازن شبیه‌سازی‌شده و میزان توانایی نرم‌افزار مذکور در تخمین عمق آبشستگی در مقابل نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت صحت سنجی نتایج حاصل از این تحقیق از نتایج مطالعات آزمایشگاهی شپارد و میلر (۲۰۰۶) استفاده‌شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که مقادیر عمق آبشستگی تخمین زده‌شده توسط مدل نسبت به مقادیر نظیر مشاهداتی دارای ضریب تغییرات ۰/۸۶۲ می‌باشد [۳۲].

۲-۱۱-۱۱- مطالعات بین المللی در زمینه پایه های قربانی شونده

در سال ۲۰۰۰ در مطالعات Melville و همکاران با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی به بررسی جهت جریان برخوردی به پایه های قربانی شونده و تاثیر وجود این پایه ها در میزان آبشستگی پایه های اصلی پرداخته شده است. مطابق شکل زیر در این مطالعه ۳ زاویه برخورد جریان به پایه ها شامل صفر، ۲۰ و ۳۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است.

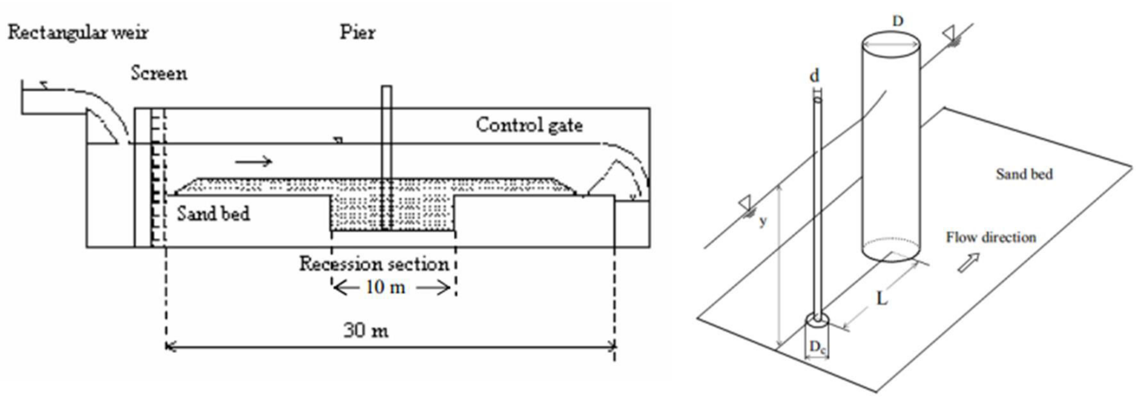


شکل ۲-۱۴: الگوی پایه های اصلی و چیدمان پایه های قربانی شونده و زاویه برخورد جریان به پایه ها در مطالعات Melville و همکاران در سال ۲۰۰۰

همانطور در شکل های فوق مشاهده می شود در این مطالعه پایه ها به شکل مقطع دایره ای و مقطع مستطیلی در نظر گرفته شده اند. همچنین در این مطالعه سرعت جریان با شرایط مختلفی به پایه ها برخورد نموده است. بر اساس نتایج این مطالعه تا حدود ۳۰٪ در شرایط مختلف پایه های قربانی شونده می توانند در کاهش مقادیر آبشستگی پایه پل ها موثر واقع شوند [۳۳].

یکی دیگر از مطالعات بین المللی انجام شده در زمینه پایه های قربانی شونده مطالعات Kayatürk و Gögüs در سال ۲۰۰۶ است. در این مطالعه با استفاده از یک تک پایه قربانی شونده با استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی به بررسی فاصله و قطر پایه قربانی شونده بر مقادیر عمق آبشستگی پایه اصلی

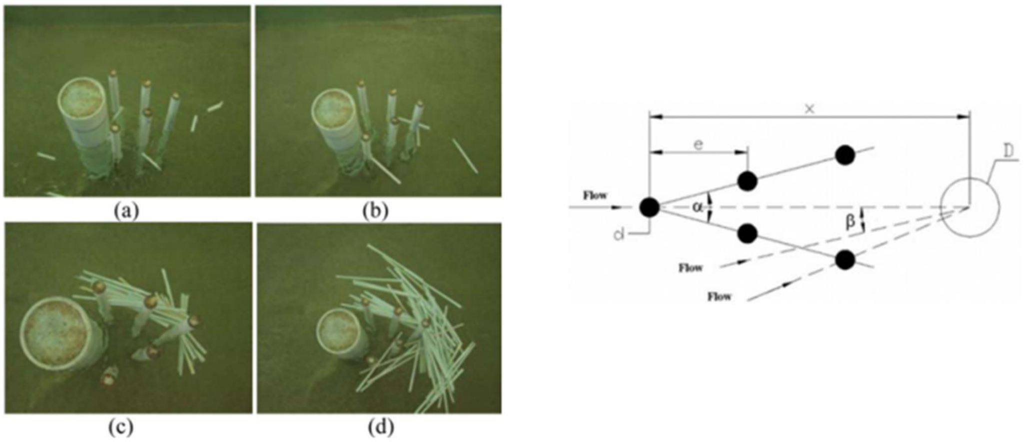
پرداخته شده است . در شکل زیر مشخصات هندسی و موقعیت قرار گیری پایه قربانی شونده در این مطالعه ارائه شده است.



شکل ۲-۱۵: شرایط مدلسازی آزمایشگاهی پایه قربانی شونده در مطالعات Kayatürk و Gögüs در سال ۲۰۰۶

نتایج این مطالعه نشان میدهد که فاصله مناسب و همچنین قطر مناسب پایه های قربانی شونده می تواند در کاهش عمق آبشستگی پایه های اصلی موثر باشند. افزایش فاصله بیشتر از مقادیر L>3D سبب کاهش تاثیر پایه های قربانی شونده خواهد شد [۳۴].

یکی دیگر از مطالعات آزمایشگاهی در زمینه پایه های قربانی شونده توسط Park و همکاران در سال ۲۰۱۵ انجام شده است. در این مطالعه تاثیر پایه های قربانی شونده در مقادیر آبشستگی پایه اصلی پل ها مورد توجه قرار گرفته است و همچنین اثر به دام اندازی قطعات معلق همانند الوارهای چوبی در پایه های قربانی شونده نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل زیر تصاویر ارائه شده در این مطالعه مشاهده می گردد.



شکل ۲-۱۶: شرایط چیدمان پایه های قربانی شونده در مطالعات Park و همکاران در سال ۲۰۱۵ و همچنین گیرکردن قطعات معلق در جریان در نواحی پایه های قربانی شونده

بر اساس نتایج مطالعات توسط Park و همکاران در سال ۲۰۱۵ بکارگیری پایه های قربانی شونده می تواند بین ۳۹ تا ۶۰ درصد عمق آبشستگی در مجاورت پایه های منفرد را کاهش دهد ولی بایستی توجه نمود که تله اندازی این پایه ها در قطعات و مواد معلق در جریان می تواند از تاثیر مناسب این پایه ها بکاهد و در برخی از شرایط افزایش عمق آبشستگی بین ۸ تا ۱۰۰ درصد ایجاد نماید [۳۵].

۲-۱۲- جمع‌بندی

با توجه به مطالب ارائه‌شده در بخش‌های قبل، روش‌های متعددی می‌تواند جایگزین روش‌های موجود (عمدتاً ریپ رپ و گابیون) گردند. در این خصوص، انجام مطالعات بیشتر و دقیق‌تر راندمان روش‌ها را در شرایط مختلف جریان آشکار می‌کند. کاربرد روش‌های مذکور در برخی موارد باعث جلوگیری کامل از گسترش آبشستگی می‌گردد. به‌عنوان‌مثال، استفاده از طوق و یا استفاده از پمپاژ می‌تواند راندمان ۱۰۰ درصد را به همراه داشته باشد. استفاده از پانل‌های هدایت‌کننده جریان نیز قابلیت کاهش عمق آبشستگی تا سقف ۹۰ را به همراه خواهد داشت، لکن کاربرد این روش‌ها ممکن است محدودیت‌ها و مشکلاتی را نیز به همراه داشته باشد. به‌عنوان‌مثال، جهت استفاده از پمپاژ لازم است که یک ایستگاه پمپاژ به‌طور دائم جریان را از داخل پایه به خارج انتقال دهد. تأسیس چنین ایستگاهی در بسیاری موارد امکان‌پذیر نبوده و هزینه‌های نگهداری فراوانی به همراه خواهد داشت. پانل‌های هدایت‌کننده

جریان نیز به‌طور گسترده در مسیر جریان قرار می‌گیرند و جریان رودخانه نیروی قابل‌توجهی به پانل‌ها وارد می‌کند و پایدارسازی پانل‌ها در مقابل جریان رودخانه، نکته مهمی است که ممکن است نصب و بهره‌برداری از پانل‌ها را با دشواری همراه سازد. شکاف‌ها، لوله‌های متصل در داخل پایه پل نیز ممکن است در اثر گذشت زمان به‌تدریج توسط رسوبات مسدود گردند. سایر روش‌ها در بسیاری موارد قابل کاربرد بوده و لازم است تحقیقات گسترده‌تری در خصوص آن‌ها صورت پذیرد تا پس از تعیین معیارهای طراحی، مورداستفاده قرار گیرند.

همچنین همان‌طور که اشاره شد، پارامترهای زیادی در آبشستگی پایه پل‌ها مؤثر هستند و محققان زیادی با این پارامترها، با توجه به داده‌های آزمایشگاهی یا صحرایی و مطالعات گسترده در خصوص مکانیزم آبشستگی، روابطی برای تخمین و پیش‌بینی عمق آبشستگی ارائه داده‌اند، که در این فصل به آنها اشاره شد. بدیهی است که در هر یک از این روابط تمام پارامترهای مؤثر در آبشستگی به دلیل پیچیدگی منظور نشده است.

فصل سوم

روش تحقیق

۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتداً معادلات حاکم بر جریان سیال از قوانین بقای جرم و مومنتوم بدست می‌آیند که به‌صورت معادلات دیفرانسیل جزیی می‌باشند. معادلات اصلی برای شبیه‌سازی جریان سه بعدی، سه معادله دیفرانسیل شامل روابط پیوستگی و اندازه حرکت در جهات x, y, z هستند. از آنجایی که غالباً در اکثر پروژه‌های مهندسی جریان، به‌صورت آشفته است انواع مدل‌های آشفتگی قابل کاربرد شرح داده می‌شود. در ادامه معرفی نرم افزار Flow-3D صورت گرفته و تکنیک‌های مختلف شبیه‌سازی عددی همانـند روش حجم سیال (VOF) و روش کـسر مساحت- حجم مانع (FAVOR) ارائه می‌شود. به‌صورت مختصر خصوصیات خاص و منحصر فرد این نرم افزار و موارد کاربردهای صنعتی نرم افزار بررسی خواهد شد. در ادامه این فصل نیز هندسهٔ پایه‌های دایره‌ای مورد استفاده در پژوهش و بستر فرسایش‌پذیر برای شبیه‌سازی میدان جریان و اثر آبشستگی بستر در اثر وجود پایه پل‌ها توسط نرم افزار SolidWork طراحی و معرفی می‌گردند.

۳-۲-معرفی نرم‌افزارهای محاسبات عددی

در راستای استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، چندین نرم‌افزار توسط شرکت‌های نرم‌افزاری با قابلیت حل معادلات مربوط به دینامیک سیالات تولید شده که هریک مزایا و معایب مربوط به خود را دارا می‌باشند. در زیر به برخی از این نرم‌افزارها اشاره شده و توضیحاتی در مورد آنها ارائه می‌شود. در این میان نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق به تفصیل توضیح داده می‌شود. با پیشرفت روزافزون مسائل مهندسی، پیچیده‌تر شدن مسائل و افزایش هزینه‌ها در بهره‌گیری از نتایج آزمایشگاهی و نیز نیاز به کسب نتایج بهتر، دقیق‌تر و با جزئیات بیشتر از مسائل مورد آزمایش، استفاده از علم دینامیک سیالات محاسباتی رو به افزایش نموده است. از طرفی با توجه به این نکته که دسترسی به جواب‌های دقیق به دلیل پیچیده بودن محاسبات از طریق روش‌های تحلیلی امکان‌پذیر نمی‌باشد و یا اینکه

استفاده از این روش‌ها مستلزم ساده‌سازی بیش از حد مسائل می‌باشد، روش‌های عددی جواب‌های بهتری در اختیار قرار می‌دهد. برای بهره‌گیری از روش‌های عددی، بدلیل بالا بودن حجم محاسبات، ناگزیر به استفاده از نرم‌افزارهای محاسباتی وجود دارد. این نرم‌افزارهای محاسباتی، امکان بدست آوردن اطلاعات کامل با جزئیات دقیق‌تر و بیشتری را فراهم می‌کنند. بطور مثال به کمک آنها حتی می‌توان مواردی از قبیل تغییرات سرعت، فشار و درجه حرارت را در کل حوزهٔ مورد مطالعه بدست آورد، درحالیکه کسب این نتایج در شرایط آزمایشگاهی امکان‌پذیر نمی‌باشد (گودرزی ۱۳۹۰).

نرم‌افزار SSIIM: SSIIM مخففی برای شبیه‌سازی رسوب در آبگیر با قابلیت چند بلوکی بوده (Sediment Simulation in Intake with Multiblock option) و یک برنامهٔ CFD سازماندهی شده و ساخته شده برای مهندسی هیدرولیک است، که بسیاری از الگوریتم‌های خاص را ترکیب می‌کند (Olsen, 2000). این نرم‌افزار قادر به استفاده از شبکه‌بندی بی ساخت و سیستم چند بلوکه، مدل‌های آشفتگی پیشرفته و الگوریتم‌های حل متنوع، مدل کردن هندسه‌های پیچیده، شبیه‌سازی انتقال رسوب می‌باشد. معادلات حاکم در این نرم‌افزار معادلات متوسط‌گیری شدهٔ زمانی ناویر- استوکس (RANS) بوده و از مدل آشفتگی $K - \varepsilon$ استاندارد و فرم $K - \varepsilon$ حالت RNG استفاده می‌کند. در SSIIM برای شرط مرزی دیواره‌ها و بستر می‌توان از تابع دیوار استاندارد اشلیختینگ استفاده نمود. الگوریتم منقطع‌سازی در این نرم‌افزار حجم محدود بوده و برای کوپل معادلات سرعت – فشار از الگوریتم SIMPLE پاتانکار و اسپالدینگ و برای محاسبهٔ شارها از روش قانون توانی Patankar و یا Upwind مرتبه دوم و از روش Rhie & Chow استفاده می‌شود (Vorestik، Malalaskra، 1390). از این نرم‌افزار بیشتر در مسائل مربوط به رسوب، انتقال رسوب و دیگر موضوعات مربوط به آن بهره گرفته می‌شود.

نرم‌افزار FLUENT: این نرم‌افزار یکی از مشهورترین نرم‌افزارهای صنعتی برای مدل‌سازی دو و سه‌بعدی مسائل می‌باشد. این نرم‌افزار بر پایهٔ روش حجم محدود عمل نموده و قابلیت‌های فراوانی از

جمله مدل‌سازی جریان‌های دائم و غیر دائم، جریان‌های لزج و غیر لزج، احتراق، جریان مغشوش، حرکت جامد و قطرات مایع در یک فاز پیوسته را داراست. نرم‌افزار FLUENT از مدل‌های آشفتگی$K - \varepsilon$ ، LES (Large Eddy Simulation) در مدل‌سازی جریان آشفته استفاده می‌کند. این نرم‌افزار امکان استفاده از دو نوع محاسبه‌گر یک دقته (One Precision) و دو دقته (Double Precision) را برای کاربران فراهم می‌کند. در اغلب موارد محاسبه‌گر دو دقته مفیدتر خواهد بود. این نرم‌افزار امکان تغییر شبکه، بصورت کامل و تحلیل جریان با شبکه‌های غیرساخت یافته برای هندسه‌های پیچیده را فراهم می‌سازد. همچنین FLUENT به کاربر اجازهٔ بهبود شبکه (مثلاً ریزتر کردن و درشت‌تر کردن شبکه در مرزها و مکان‌های لازم در هندسه) را می‌دهد. این نرم‌افزار این قابلیت را در اختیار کاربران حرفه‌ای قرار داده که بتوانند صفحات کاربری را با تعریف توابع و ماکروهای جدید به دلخواه تنظیم نمایند. این نرم‌افزار از مش‌های غیرساختار برای کاهش زمانی که برای حل شبکه مصرف می‌شود، بهره برده و مدل‌سازی هندسی و پروسهٔ تولید مش را ساده کرده و می‌توان مدل‌های پیچیده‌تر را نیز پیاده کرد (سلطانی و رحیمی اصل ۱۳۸۶). محیط گرافیکی این نرم‌افزار در نسخه‌های مختلف آن متفاوت بوده، اما با بهبود محیط گرافیکی در نسخه‌های اخیر و برقراری ارتباط بین استفاده کننده و محیط نرم‌افزار آسان‌تر شده است.

نرم‌افزار ANSYS: این نرم‌افزار در ۱۹۷۱ توسط شرکت آمریکایی Swanson بعنوان یکی از پیشگامان نرم‌افزارهای اجزای محدود ساخته شد و مورد استفادهٔ محققان قرار گرفت و جزء اولین نمونه‌هایی است که آنالیز غیرخطی، مکانیک شکست، مخازن و سایر آنالیزها را در بستهٔ نرم‌افزاری خود قرار داد. مدل ANSYS یکی از نرم‌افزارهای کاربردی اجزای محدود جهت تحلیل مسائل می‌باشدکه نخست برای تحلیل مسائل سازه‌ای طراحی و سپس برای استفاده در تحلیل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی نیز توسعه داده شد. نخستین بستهٔ نرم‌افزاری ANSYS برای تحلیل مسائل مربوط به سیالات (FLOTRAN (TRANSPORT FLOW ارائه شد. این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی مسائل استاتیک و دینامیک سازه‌ای، انتقال حرارت و مسائل مربوط به سیالات را دارد.

بعلاوه ANSYS می‌تواند مسائل آکوستیک (Acoustic) و الکترومغناطیس (Electro-Magnetic) را در نظر بگیرد (جاهد و همکاران ۱۳۸۵).

نرم‌افزار ANSYS CFX: این نرم‌افزار توسعه یافتهٔ نرم‌افزار ANSYS بوده که توانایی تحلیل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی در آن وارد شده است. این نرم‌افزار ابتدا با نام CFD-FLOW3D توسط شرکت UKAEA عرضه و سپس تغییر نام یافت و درنهایت در ۲۰۰۳ توسط شرکت نرم‌افزار ANSYS خریداری شد. از توانایی‌های این نرم‌افزار می‌توان به کارایی آن روی شبکه‌هایی مرکب از المان چهاروجهی، شش وجهی، منشوری و یا هرمی‌اشاره نمود (اعتصام ۱۳۸۸). این نرم‌افزار قابلیت تحلیل جریان آرام و آشفته، سیالات تراکم‌پذیر و تراکم ناپذیر، سیالات نیوتنی یا غیرنیوتنی (سیالی که از یک رابطهٔ خطی بین تنش برشی و کرنش برشی پیروی نمی‌کند) و جریان با سطح آزاد را دارد و در زمینه گوناگون نظیر هوا- فضا، عمران، محیط زیست و مسائل دریایی نیز کاربرد دارد نرم‌افزار ANSYS CFX یک نرم‌افزار با هدف عمومی دینامیک سیالات محاسباتی است که یک حل‌گر پیشرفته را با قابلیت‌های پیش و پس پردازشگر قدرتمند ترکیب و توانایی مدل‌سازی مواردی از قبیل جریان پایدار و ناپایدار، جریان آرام و آشفته، جریان مادون صوت و مافوق صوت، نیروی شناوری، جریان غیر نیوتنی، جریان چندفازی، مسائل احتراق را دارا است. این بسته شامل چهار مدل نرم‌افزاری است که یک هندسه و یک شبکه‌بندی را دریافت و اطلاعات مورد نیاز را برای تحلیل انتقال می‌دهد (Flow3D manual, 2010).

نرم‌افزار FLOW-3D: این نرم‌افزار همان‌طور که از نام تجاری آن پیداست، مختص جریان‌های سه‌بعدی بوده و در تحلیل مسائل جریان‌های با سطح آزاد قابلیت ویژه‌ای دارد. این نرم‌افزار از روش حجم محدود در محاسبات در شبکه‌بندی منظم مستطیلی بهره می‌گیرد. این نرم‌افزار از شش مدل آشفتگی مدل طول اختلاط پرانتل (Prandtl Mixing Length)، مدل انتقال یک معادله‌ای، مدل انتقال دو معادله‌ای، LES (Large Eddy Simulation)، مدل $k - \varepsilon$ و RNG استفاده می‌کند. این نرم‌افزار ابزار مدل‌سازی توانمندی است که دید مهندسی با ارزشی دربارهٔ بسیاری از فرآیندهای

فیزیکی جریان در اختیار قرار می‌دهد. علاوه بر قابلیت‌های ویژه برای پیش‌گویی دقیق جریان‌های با سطح آزاد، FLOW-3D نرم‌افزاری ایده‌آل برای استفاده در طراحی و در فرآیندهای بهینه‌سازی تولید است(Flow-3D Help, 2010) .

۳-۳-معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر جریان سیال از قوانین بقای جرم و مومنتوم بدست می‌آیند و به صورت معادلات دیفرانسیل جزئی می‌باشند. به‌طور کلی برای بدست آوردن معادلات جریان، سه گام را می‌توان در نظر گرفت اول انتخاب قوانین پایه صحیح، دوم کاربرد قوانین توسط یک مدل مناسب جریان و سوم اقتباس معادلات ریاضی که مجسم کننده قوانین فیزیکی فوق باشند. معادلات اصلی برای شبیه‌سازی جریان سه بعدی، سه معادله دیفرانسیل شامل روابط پیوستگی و اندازه حرکت درجهات x, y, z هستند.

۳-۳-۱- معادله پیوستگی

معادله پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن رابطه تعادل برای یک المان سیال به‌دست می‌آید. معادله عمومی پیوستگی در نرم افزار flow-3d به شکل زیر است:

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \square \ _{x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \square \ _{y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \square \ _{z}) = 0 \qquad (۱-۳)$$

که در آن v_f حجم باز جریان ، ρ چگالی سیال است. مولفه‌های سرعت (u, v, w) در جهات (x, y, z) می‌باشند. A_x سطح باز در جهت x است، A_y و A_z به‌طور مشابه سطح باز در جهات y و z می-باشند[۳۶].

۳-۳-۲- معادلات اندازه حرکت

معادلات حرکت سیال با مولفه‌های سرعت (u, v, w) در سه جهت مختصات، یعنی معادلات ناویر-استوکس به شکل زیر هستند:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left(uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial y}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+G_x+f_x$$
$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left(uA_x\frac{\partial v}{\partial x}+vA_y\frac{\partial v}{\partial y}+wA_z\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+G_y+f_y$$
$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left(uA_x\frac{\partial w}{\partial x}+vA_y\frac{\partial w}{\partial y}+wA_z\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+G_z+f_z$$

(۳-۲)

در این معادلات (G_x, G_y, G_z) شتاب‌های جرم، (f_x, f_y, f_z) شتاب‌های لزجت است. برای متغیرها لزجت دینامیکی μ، شتاب‌های لزجی

به شکل زیر هستند:

$$\rho V_F f_x = wsx-\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(A_x\tau_{xx}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(A_y\tau_{xy}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(A_z\tau_{xz}\right)\right\}$$
$$\rho V_F f_y = wsy-\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(A_x\tau_{xy}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(A_y\tau_{yy}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(A_z\tau_{yz}\right)\right\}$$
$$\rho V_F f_z = wsz-\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(A_x\tau_{xz}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(A_y\tau_{yz}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(A_z\tau_{zz}\right)\right\}$$

(۳-۳)

که در آن:

$$\tau_{xx}=-2\mu\left\{\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{1}{3}(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z})\right\} \qquad \tau_{xy}=-\mu\left\{\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial u}{\partial x}\right\}$$
$$\tau_{yy}=-2\mu\left\{\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{1}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)\right\} \qquad \tau_{xz}=-\mu\left\{\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right\}$$
$$\tau_{zz}=-2\mu\left\{\frac{\partial w}{\partial z}-\frac{1}{3}(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z})\right\} \qquad \tau_{yz}=-\mu\left\{\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right\}$$

(۳-۴)

در معادلات فوق جملات wsx، wsy و wsz بیانگر تنش‌های برشی دیواره‌ها هستند. اگر این جملات حذف شوند، دیگر تنش برشی دیواره‌ای نخواهیم داشت زیرا جملات باقیمانده شامل کسر مساحت‌های جریان (A_x, A_y, A_z) می‌شوند که در آن‌ها دیواره‌ها در نظر گرفته نشده‌اند. تنش‌های روی دیواره‌ها به وسیله فرض سرعت مماسی صفر در قسمتی از سطح محدود به جریان شبیه‌سازی می‌شوند. شبکه و مرزهای موانع متحرک جزء موارد استثنا هستند زیرا در آن‌ها سرعت مماسی غیر صفر است.

۳-۳-۳- مدل‌های آشفتگی

غالباً در اکثر پروژه‌های مهندسی جریان به صورت آشفته است. در اعداد رینولدز پایین جریان آرام است ولی در اعداد رینولدز بالا مشاهده می‌شود که جریان آشفته می‌شود، به‌طوری‌که یک حالت تصادفی از حرکت در جایی که سرعت و فشار به‌طور پیوسته درون بخش‌های مهمی از جریان نسبت به زمان تغییر می‌کنند گسترش می‌یابد. این جریان‌ها به صورت در ادامه ارائه شده‌اند، شناسایی می‌گردند:

- جریان‌های آشفته به شدت غیر یکنواخت هستند. در این جریان‌ها اگر تابع سرعت در برابر زمان ترسیم شود، بیشتر شبیه به یک تابع تصادفی خواهد بود. کلمه بی نظم[1] تا حدودی می‌تواند بیانگر وضعیت این جریان‌ها باشد.
- این جریان‌ها معمولاً سه‌بعدی هستند، پارامتر سرعت میانگین گاهی اوقات ممکن است که تنها تابع دو بعد، اما هم چنین در هر لحظه ممکن است سه بعدی باشند.
- در اینجا ذکر این نکته نیز لازم است که آشفتگی جریان باعث می‌شود که جریان‌هایی با مقادیر متفاوت اندازه حرکت با یکدیگر برخورد کنند. گرادیان‌های سرعت بر اثر ویسکوزیته

---
[1] Chaotic

سیال کاهش می‌یابند و این امر باعث کاهش انرژی جنبشی سیال می‌شود. به بیان دیگر می‌توان گفت که اختلاط یک پدیده مستهلک کننده انرژی است.

- طی سال‌های اخیر نشان داده شده است که جریان‌های آشفته ساختاری نوسانی دارند. به بیان دیگر می‌توان گفت که به کمک پدیده‌های تکراری و قابل پیش‌بینی می‌توان فرایندهای مؤثر بر وضعیت جریان را در قسمت اعظم آن به دست آورد. هم‌چنین قسمت غیر قابل پیش‌بینی جریان باعث می‌شود که هر یک از پدیده‌ها حالات مختلفی از نظر اندازه، کشیدگی و پریود زمانی بین هر دو تکرار داشته باشند. به همین دلیل بیان روابطی برای این قسمت بسیار مشکل است.

تمام مشخصاتی که به آن‌ها اشاره شد برای بررسی یک جریان آشفته مهم هستند. تاثیراتی که توسط آشفتگی ایجاد می‌شود بسته به نوع کاربری ممکن است ظاهر نشوند و به همین دلیل باید این جریان‌ها را با توجه به نوع و کاربری آن مورد بررسی قرار داد. برای بررسی جریان‌های آشفته روش‌های مختلفی وجود دارد که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره خواهد شد.

فرضیه بوزینسک: بسیاری از مدل‌های آشفتگی بر پایه این فرضیه هستند. با افزایش نرخ میانگین تغییر شکل‌ها، آشفتگی افزایش می‌یابد. فرضیه بوزینسک می‌گوید که می‌توان تنش‌های رینولدز را مشابه تنش های ویسکوزیته به نرخ میانگین تغییر شکل‌ها ارتباط داد:

تنش‌های ویسکوزیته: (۳-۵)

$$\tau_{ij} = \mu e_{ij} = \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$$

ارتباط تنش‌های رینولدز با نرخ میانگین تغییر شکل‌ها:

(۳-۶)

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$$

μ_t ویسکوزیته گردابه‌ای نامیده شده واحد آن Pa.s. است.

مدل‌های آشفتگی با توجه به فرضیات گفته شده و تعداد معادلات دیفرانسیل جهت ارتباط تنش-های آشفتگی با سرعت‌های متوسط‌گیری شده یا گرادیان آن‌ها تقسیم می‌شوند. در این تقسیم‌بندی، مدل‌ها شامل مدل‌های صفر معادله‌ای[1]، مدل‌های یک معادله‌ای[2]، مدل‌های دو معادله‌ای[3]، مدل‌های دارای معادله تنش[4] و مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ[5] می‌باشند.

در مدل‌های صفر معادله‌ای(جبری): هیچگونه معادله دیفرانسیلی برای کمیت‌های آشفتگی ارائه نمی‌شود. این مدل‌ها نسبتاً ساده بوده و داده‌های تجربی و آزمایشگاهی در آن‌ها نقش اساسی دارد و تنش‌های آشفتگی در هر جهت متناسب با گرادیان سرعت می‌باشد. نمونه‌ای از این مدل‌ها شامل مدل لزجت گردابه‌ای ثابت[6]، مدل طول اختلاط پرانتل[7] و مدل لایه برش آزاد پرانتل[8] می‌باشند. از مهم‌ترین مدل‌های صفر معادله‌ای، مدل اختلاط پرانتل می‌باشد، پرانتل در سال ۱۹۵۲ نظریه طول اختلاط[9] را ارائه نمود. اساس این نظریه بر آن است که بیش‌تر انرژی جنبشی درون گردابه‌های بزرگ‌تر نهفته است از اینرو مقیاس طول آشفتگی l مشخصه این گردابه‌ها می‌باشد که روی جریان متوسط تأثیر می‌گذارد [۳۷]. مدل طول اختلاط پرانتل کاربرد آسانی دارد و محاسبات آن بسیار ساده است از اینرو برای لایه‌های برشی نازک مانند فواره‌ها دنباله‌ها و لایه مرزی پیش‌بینی‌های خوبی ارائه می‌دهد. این مدل برای توضیح جریان‌هایی با جدایی و چرخش مجدد کاملا ناتوان است و فقط قادر به محاسبه خواص جریان متوسط و تنش برشی آشفته می‌باشد[۳۸].

---

[1] Zero equation models
[2] One equation models
[3] Two equation models
[4] Stress equation models
[5] Large eddy simulation models
[6] Constant eddy viscosity model
[7] Prandtl mixing-length model
[8] Prandtl's free shear layer model
[9] Mixing length

مدل‌های یک معادله‌ای: بر خلاف مدل‌های صفر معادله‌ای، از یک معادله برای انتقال کمیت آشفتگی استفاده می‌کنند. این معادله ارتباط بین مقیاس سرعت نوسانی و کمیت آشفتگی می‌باشد که جذر انرژی جنبشی آشفتگی ($\sqrt{k}$) به‌عنوان مقیاس سرعت درحرکت آشفته مد نظر می‌باشد و مقدار آن توسط معادله انتقال محاسبه می‌گردد. لزجت گردابه‌ای با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$\nu_t = c_\mu l \sqrt{k} \qquad (۷-۳)$$

در جریان آشفته در استفاده از این مدل‌ها تعیین توزیع مقیاس طولی بسیار مشکل است. در جریان-های بسیار پیچیده، تعیین توزیع مقیاس طول بصورت تجربی بسیار مشکل است، لذا جهت افزایش محدوده توانایی مدل‌های آشفتگی یک معادله دیفرانسیل دیگر برای تعیین طول مقیاس در نظر گرفته می‌شود.

مدل‌های دو معادله‌ای: از ساده‌ترین مدل‌ها بوده که نتایج بهتری در جریان‌هایی همچون جریان-های چرخشی که مدل طول اختلاط قابلیت استفاده ندارد، ارائه می‌دهند. تقسیم‌بندی این مدل‌ها بر اساس محاسبه تنش رینولدز و یا ویسکوزیته گردابه‌ای به سه روش ویسکوزیته گردابه‌ای، جبری و تنش رینولدز غیرخطی انجام می‌گیرد. این روش‌ها دو معادله دیفرانسیل را حل می‌کنند که شامل معادله k و معادله ε می‌باشند. معادله انرژی جنبشی، k بیان کننده مقیاس سرعت است، بدین صورت که اگر قرار باشد سرعت‌های نوسانی مورد بررسی قرار گیرند، می‌توان جذر انرژی جنبشی حاصل از آشفتگی در واحد جرم را به‌عنوان مقیاس در نظر گرفت، معادله نرخ میرایی انرژی جنبشی، ε نیز مقیاس طول است. در حقیقت مقیاس طول، اندازه گردابه‌های بزرگ دارای انرژی جنبشی را می‌دهد که باعث انتقال آشفتگی در توده سیال می‌شود. اندازه گردابه‌هایی که در جریان وجود دارد و بوسیله همرفت جابجا می‌شوند، اولاً بسیار وابسته به اندازه اولیه آن‌هاست، ثانیاً عامل دوم که در اندازه گرداب یا پارامتر l دخالت دارد میزان از بین رفتن انرژی(میرایی) است. به‌طوری که نابودی گرداب‌های کوچک باعث افزایش اندازه گرداب‌های بزرگ در سیال می‌شود. عامل سوم در تعیین l پدیده کشش گردابی

است که این عامل سبب کاهش اندازه گرداب‌ها می‌گردد. تعادل سه عامل فوق، اساس تشکیل معادله میرایی انرژی است[۳۹].

مدل $k-\varepsilon$ استاندارد: بیش‌ترین کاربرد را در تحلیل جریان‌های آشفته دارد، مدل استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل یک روش نیمه تجربی است که معادله k آن دقیقاً از ترکیب معادلات رینولدز حاکم بر جریان مشتق می‌شود اما معادله ε حاکم، براساس شواهد تجربی و آزمایشگاهی و روابط ریاضی حاصل می‌گردد. در استخراج این معادلات چنین فرض شده که جریان کاملاً متلاطم بوده و اثر لزجت مولکولی بسیار ناچیز است. معادلات حاکم بر این مدل بصورت زیر بیان می‌شود:

$$Eq\ \text{k}:\quad \rho\frac{Dk}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\delta k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon$$

$$Eq\ \varepsilon:\ \rho\frac{D\varepsilon}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\delta\varepsilon}\right)\frac{\delta\varepsilon}{\delta x_i}\right]+c_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k+G_{s\varepsilon}G_b\right)-c_{2e}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۸-۳)$$

G_{b} و G_{k} مرجع جرم معادله k می‌باشند که به ترتیب اثر شناوری و گرادیان سرعت میانگین را در معادله اعمال می‌کنند و در آن لزجت گردابه‌ای با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t=\rho c_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (۹-۳)$$

δk و $\delta\varepsilon$ به اعداد پرانتل آشفتگی مشهور هستند و داریم:

c_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	δk	$\delta\varepsilon$
۰/۰۹	۱/۴۴	۱/۹۲	۱/۰۰	۱/۳۰

ثابت $c_{3\varepsilon}$ در معادله ε اثر سرعت در جهت ثقل و عمود بر آن را بیان می‌کند و برابر است با:

$$c_{3\varepsilon}=\tanh\left|\frac{v}{u}\right| \qquad (۱۰-۳)$$

بنابراین چنان‌چه جهت جریان منطبق با جهت ثقل باشد، در لایه برشی این ثابت برابر ۱ خواهد شد و اگر جهت جریان عمود بر جهت ثقل باشد این مقدار صفر خواهد بود. این مدل ابزار نسبتاً ساده محاسباتی است، منجر به محاسبات پایداری می‌شود که نسبتاً به سادگی همگرا می‌شوند و برای اکثر جریان‌ها تخمین‌های معقولی را ارائه می‌دهد. تخمین‌های ضعیف در جریان‌های چرخشی، جریان‌های با مناطق قوی جدایی جریان، جت‌ها، جریان‌های نامحدود خاص، جریان‌های کاملاً توسعه یافته در مجاری غیر دایروی نیز از جمله معایب این روش می‌باشند. این مدل تنها برای جریان‌های کاملاً آشفته به کار می‌رود[۳۸].

مدل‌های دارای معادله تنش: دسته دیگر مدل‌های دارای معادله تنش می باشند. مدل‌های آشفتگی که اخیراً به وجود آمده‌اند بر پایه گروه‌های نرمال شده رینولدز می‌باشد. این دیدگاه شامل معادله ای آماری برای استحصال یک معادله متوسط گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی است. مدل‌های بر پایه معادلات تنش، کمتر روی پارامترهای تجربی تکیه دارند. مدل RNG از معادلاتی شبیه معادلات مدل $k-\varepsilon$ استفاده می‌کند. اما ثوابتی که به‌طور تجربی در مدل $k-\varepsilon$ استاندارد بدست آمده است، در مدل RNG به‌طور صریح استحصال می‌شود. به‌طور کلی مدل RNG کاربرد وسیعی نسبت به مدل $k-\varepsilon$ دارد.

مدل RNG: روش آشفتگی جریان بر اساس یک تکنیک آماری دقیق و به کمک روابط ریاضی بدست می‌آید. در این مدل در مقایسه با حالت استاندارد یک ترم اضافه در معادله ε وارد می‌شود که باعث افزایش دقت محاسبات در جریان کرنشی می‌گردد. این مدل نسبت به حالت استاندارد، در جریان‌های چرخشی کارایی بیش‌تری دارد و بـر خلاف آن به منظور تعیین اعـداد آشفتگی پرانتل از رابطه تحـلیلی استفاده می‌شود. بدین ترتیب این مدل در اعداد رینولدز پایین دقت مناسبی دارد و به همین دلیل از این مدل در تعیین مقادیر آشفتگی جریان در میدان‌های دارای انحنا و یا پیچیدگی هندسی، بیشتر استفاده می‌شود. معادلات حاکم در این مدل به صورت روابط زیر می‌باشند:

$$Eq\ \text{k}:\ \rho\frac{Dk}{Dt}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\alpha_k\mu_{eff}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)+G_k+G_b-\rho\varepsilon$$

$$Eq\ \varepsilon:\ \rho\frac{D\varepsilon}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\alpha_\varepsilon\mu_{eff}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}\right]+c_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k+c_{3\varepsilon}.G_b\right)-c_{2e}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-R \qquad (۱۱-۳)$$

لزجت مؤثر گردابه‌ای μ_{eff} در معادلات فوق توسط روابط زیر تعیین می‌شود:

$$\bar{v}=\frac{\mu_{eff}}{\mu}\ \text{ and }\ d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right)=1.72\frac{\bar{v}}{\sqrt{\left(\bar{v}-\left(1+c_v\right)\right)}}d\bar{v} \qquad (۱۲-۳)$$

چنانچه رابطه دیفرانسیلی فوق انتگرال‌گیری شود لزجت گردابه‌ای تعیین می‌شود که در مقادیر رینولدز بالا این رابطه بصورت رابطه مشهور $\mu_t=\rho c_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$ تبدیل می‌شود. البته در مقادیر رینولدز کم و بخصوص در نزدیکی دیواره می‌توان از همان حالت دیفرانسیلی استفاده نمود. مقادیر معکوس عدد پرانتل آشفتگی، α_k وα_ε، بر اساس رابطه زیر معین می‌شود:

$$\left|\frac{\alpha-1.3929}{\alpha_0-1.3929}\right|^{0.3621}\left|\frac{\alpha+2.3929}{\alpha_0+2.3929}\right|^{0.3679}=\frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \qquad (۱۳-۳)$$

در جریان‌های با رینولدز بالا $1 \gg \left(\frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}}\right)$ که جریان کاملاً آشفته است مقدار $\alpha_0=1$ بوده و معکوس اعداد پرانتل آشفتگی مقادیر ثابتی دارند؛ یعنی $\alpha_\varepsilon=\alpha_k=1.393$ ترم R اضافه شده به معادله RNG، باعث اصلاح این معادله در نواحی که نرخ کرنش زیاد باشد، شده و طبق رابطه زیر تعریف می‌-شود:

$$R=\frac{c_\mu\rho\eta^3(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۱۴-۳)$$

که در معادله فوق $\eta\equiv sk/\varepsilon$ می‌باشد و s بیانگر مدول نرخ کرنش متوسط می‌باشد که رابطه آن بر حسب نرخ کرنش متوسط چنین است:

$$s_0=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\quad \text{and}\quad s\equiv\sqrt{2{s_0}^2}$$

(۱۵-۳)

در این مدل ثابت‌های معادله دیفرانسیل به صورت زیر تعریف می‌شوند[۳۹]:

c_μ	$C_{\varepsilon1}$	$C_{\varepsilon2}$	c_v	β	η_0
۰/۰۸٤٥	۱/٤۲	۱/٦۸	۱/۰۰	۰/۰۱۲	٤/۳۸

مدل‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES): برای شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ از تاثیرات مدل‌سازی اتمسفری استفاده می‌کند. مبنای طرح بر این اساس است که باید تمام ساختارهای آشفتگی جریان که به وسیله الگوریتم‌های شبکه بندی ایجاد می‌شود، محاسبه شده و تنها تقریبی از آن‌ها که به‌طور بر جسته نشان داده می‌شوند، بسیار کوچکتر از مقادیر محاسبه ای باشد. وقتی که از مدل LES استفاده می‌شود، مهم است دقت کنیم، مدل ذاتاً سه بعدی و تابع زمان است و نوسانات باید به وسیله شرایط مرزی ورودی و یا خروجی مقداردهی شوند. استفاده از مدل نیازمند ملاحظات فراوانی است، اما محاسبات بوسیله یک CPU قوی به‌طور کامل انجام پذیر است. همچنین این مدل اطلاعات بیشتری را نسبت به مدل RNG فراهم می‌کند.

۳-۴-معرفی نرم افزار FLOW-3D

آغاز کار مدل عددی FLOW-3D را می‌توان سال ۱۹۶۳، هنگامی که در آزمایشگاه Los Alamos (LANL) دکتر C.W. Tony Hirt یک روش منحصر به فرد جهت تعیین سطح آزاد آب با نام VOF (Volume of Fluid) ارائه داد، دانست. ماموریت شغلی و علمی او در آن زمان گسترش و بهبود یک روش برای مدل نمودن دینامیک سیالات برای کاربردهای علمی و صنعتی بود. بر این اساس جهت گسترش و بهبود کار، از راهکارهایی همچون اخذ نظرات واحدهای صنعتی و محاسباتی برای ایجاد یک نرم افزار CFD (دینامیک سیالات محاسباتی) استفاده گردید. این روند کار منجر به ایجاد یک نرم‌افزار با قابلیت بالا به نام FLOW-3D در ۱۹۸۵ گردید. اکنون پس از سال‌ها با ارتقاء نرم افزار، FLOW-3D، یک نرم‌افزار جامع دینامیک سیالات محاسباتی برای مقاصد تجاری، علمی، نظامی و صنعتی می‌باشد.

نرم‌افزار FLOW-3D یک مدل مناسب برای مسائل پیچیده سیالات می‌باشد، که دارای بازه کاربرد وسیعی می‌باشد. این برنامه برای جریان‌های سه بعدی غیر ماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند کاربرد دارد. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود در شبکه‌بندی منظم مستطیلی استفاده می‌شود. به لحاظ استفاده از روش حجم محدود در یک شبکه منظم، شکل معادلات گسسته شده مورد استفاده نظیر معادلات گسسته شده در روش تفاضل محدود می‌باشند. بر این اساس FLOW-3D از روش‌های دقت مرتبه اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد، که در ادامه شرح داده خواهد شد. همچنین این نرم‌افزار از پنج مدل آشفتگی نظیر مدل‌های $k - \varepsilon$ و RNG استفاده می‌کند. در این نرم‌افزار از دو تکنیک برای شبیه‌سازی هندسی استفاده شده است. تکنیک اول روش حجم سیال [1] (VOF) است که برای نشان دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد و روش دوم، روش کسر مساحت -حجم مانع [2](FAVOR) نام دارد و برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد (Flow Science, 2014).

۳-۴-۱-مدل‌های آشفتگی مورد استفاده در نرم‌افزار Flow-3D

مدل‌های آشفتگی که در نرم‌افزارFlow-3D مورد استفاده قرار می‌گیرند بدین شرح می‌باشند :

- Prandtl mixing length
- One-equation transport
- Two-equation transport
- $k - \varepsilon$
- RNG(renormalized group theory)
- Large eddy simulation

همان‌گونه که مشاهده می‌شود تعداد مدل‌های آشفتگی ارائه شده قابل توجه می‌باشد که این به علت کاربرد وسیع نرم‌افزار Flow-3D در زمینه‌های متفاوت می‌باشد (Flow Science, 2014).

---

[1] Volume of Fluid

[2] Fractional Area-Volume Obstacle Representation

۳-۴-۲-خصوصیات خاص و منحصربه فرد نرم افزار Flow-3D

اولین خصوصیت Flow-3D این است که از یک سیستم شبکه‌بندی مستطیلی با قابلیت تغییر بالا برای شبکه‌بندی استفاده می‌کند. این قابلیت موجب می‌شود که شبکه و یا هندسه به‌صورت جدا و مجزا از یکدیگر قابل تفکیک باشند. به عبارت ساده‌تر از یک سیستم شبکه‌بندی ثابت متصل به هندسه و یا اجزاء محدود استفاده نمی‌کند .همچنین برای بالا بردن راندمان و انعطاف بیشتر در شبکه‌بندی قابلیت استفاده از سیستم شبکه‌بندی چندگانه در برنامه وجود دارد. نرم افزار Flow-3D از یک تکنیک خاص به نام FAVOR سود می برد، که برای معین نمودن نواحی هندسه کلی، از شبکه‌بندی مستطیلی استفاده می‌کند. در این روش برای هر حجم کنترل، مقدار فشار، سرعت، دما و ... به‌صورت مجزا محاسبه می‌شود. راحتی روش FAVOR در مدل نمودن نواحی با هندسه پیچیده می‌باشد، اما سوال این است که آیا این تکنیک خاص قابلیت رقابت با روش‌های مانند اجزاء محدود (Finite element) و یا(Body-fitted coordinate (BFC را دارد یا خیر؟ مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تفاوت پاسخ‌ها بسیارناچیز می‌باشد و استفاده از روش مذکور می‌تواند پاسخ‌هایی را با دقت بالا دهد.

مساله دیگری که Flow-3D را از سایر برنامه‌های CFD متمایز می‌سازد، نحوه عملکرد آن با جریان سطوح آزاد می‌باشد. در این نرم‌افزار سطوح آزاد با روش VOF، مدل می‌شوند. این نرم‌افزار تمامی ملزومات کافی برای مدل نمودن جریانات با سطوح آزاد را دارا می‌باشد. لازم به ذکر است که در نسخه ۱۰/۰۱ نرم‌افزار Flow-3D قابلیت ورود هوا به برنامه اضافه شده است (Flow Science, 2014).

۳-۴-۳-مدل آبشستگی

مدل آبشستگی[1] در نرم‌افزار Flow-3D برای شبیه‌سازی انتقال، فرسایش و ته نشینی و تغییر وضعیت استقرار رسوبات در اثر جریان سیال می‌باشد. این مدل از دو میدان غلظت بار معلق و بار بستراستفاده

[1] Sediment Scour

می‌کند. جابجایی و بلند شدن رسوبات معلق با سیال در اثر تغییر گرادیان فشار محلی است. این رسوبات معلق ممکن است ناشی از جریان ورودی حاوی ذرات معلق و یا فرسایش بستر ایجاد شوند. رسوبات بستر توسط ذرات مجاور محدود و لذا براحتی جابجا نشده و فقط در صورتیکه بصورت فرسایش یافته در سطح مشترک بستر و سیال به بار معلق تبدیل شوند، حرکت می‌کنند. بار معلق در صورتی به بار بستر تبدیل می‌شود که سرعت ته‌نشینی بیشتر از سرعت فرسایش بستر باشد. قسمتی از حجم کنترل که توسط ذرات جامد رسوب و سیال اشغال شده بترتیب با نمادهای[۱] f_S و[۲] f_L تعریف می‌شود بطوریکه:

(معادله ۳-۱)

$$f_s + f_L = 1$$

بار معلق لزجت واقعی سیال را افزایش می‌دهد. این افزایش تا زمانی ادامه دارد که جزء حجمی ذرات جامد(f_S) به حد جزء حجمی چسبندگی[۳](f_{SCO}) برسد. پس از آن افزایش بار معلق سبب بالارفتن لزجت نشده، بلکه سبب می‌شود ذرات شروع به فعالیت با رفتار جامدگونه کنند. در اینحالت لزجت متوسط سیال از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود (Wei, 1992):

(۳-۲)

$$\mu^* = \mu_f \left[1 - \frac{\min(f_S, f_{SCO})}{f_{SCR}}\right]^{1.5}$$

که در آن μ_f ویسکوزیتهٔ مولکولی سیال و f_{SCR} جزء بحرانی ذرات رسوب[۴] می‌باشد که مقدار پیش فرض آن ۰/۶۷ انتخاب شد. μ^* ویسکوزیتهٔ افزایش یافته بواسطهٔ رسوبات معلق در سیال است که حداکثر آن به ازای مقدار جزء بحرانی رسوبات برابر ۱۸ μ_f می‌باشد. اگر کسر حجمی رسوب بیشتر یا مساوی مقدار f_{SCR} باشد، دانسیتهٔ رسوب متراکم برابر با $\rho_s \times f_{SCR}$ می‌باشد که جزء شرایط اولیهٔ مدل می‌باشد (موحدی ۱۳۹۰). چگالی ظاهری $\bar{\rho}$ بصورت یک تابع خطی از حجم رسوبات فرض می‌گردد:

[1] Solid Volume Fraction
[2] Liquid Volume Fraction
[3] Cohesive Solid Fraction
[4] Critical Solid Fraction

(معادله ۳-۳)

$$\bar{\rho} = \rho_L + f_s(\rho_s - \rho_L)$$

ρ_s و ρ_L بترتیب دانسیتهٔ ظاهری ذرات رسوب و سیال هستند. طبق تعریف، *Drift* ته‌نشینی ذرات رسوب تحت اثر نیروهای شناوری مؤثر بر ذرهٔ رسوب است. در مدل آبشستگی Flow-3D ذرات رسوب بصورت کروی فرض شده که تحت اثر لزجت سیال قرار دارند. لذا مطابق رابطهٔ زیر ضریب ته‌نشینی D_f بدست می‌آید:

(۳-۴)

$$D_f = \frac{d_{50}^2 \times (\rho_s - \rho_L)}{18\mu}$$

بنابراین برای محاسبهٔ ته‌نشینی خواهیم داشت:

(۳-۵)

$$u_{drif} = D_f \times f_L \frac{\nabla P}{\bar{\rho}} = \frac{f_L \times d_{50}^2}{18\mu} \frac{\nabla P}{\bar{\rho}} \left(\rho_s - \rho_L\right)$$

در رابطهٔ بالا d_{50} قطر متوسط ذرات رسوب، μ لزجت سیال (آب)، $\frac{\nabla P}{\bar{\rho}}$ گرادیان پتانسیل مکانیکی یا شتاب بدنه (ذرات رسوب) می‌باشد. $\frac{\nabla P}{\bar{\rho}}$ تا ۱۰ برابر بزرگی شتاب ثقل قابل افزایش بوده تا تأثیرات نوسان عددی فشار محو شود. در مجاورت سطح آزاد سیال شتاب بدنه با شتاب ثقل (g) جایگزین می‌شود. از آنجا که رسوبگذاری فقط با حضور ذرات جامد (رسوب) امکانپذیر است، لذا ضریب f_L در صورتیکه حجم کنترل از رسوبات پر باشد برابر صفر بوده و بنابراین $u_{drif} = 0$ خواهد شد. همچنین مدل Flow-3D برای محاسبهٔ نیروی شناوری برای محاسبهٔ ضریب ته‌نشینی از رابطهٔ زیر بهره می‌گیرد:

(۳-۶)

$$D_f = \begin{cases} \dfrac{d_{50}^2 \times \left(\rho_s - \rho_L\right)}{18\mu} & \text{If} \quad f_{sco} \le f_s \le f_{SCR} \\ \left[\dfrac{f_s - f_{SCR}}{f_{SCO} - f_{SCR}}\right]^{-2} \left[1 - \dfrac{f_s - f_{SCR}}{f_{SCo} - f_{SCR}}\right]^3 & \\ 0 & \text{If} \quad f_{SCR} \le f_s \end{cases}$$

در سطح رسوبات بستر تنش برشی فعال بوده و سبب فرسایش و جابجائی رسوب در سطح بستر می‌شود. این فرسایش تابعی از تنش برشی سیال در سطح، تنش برشی بحرانی و چگالی سیال و رسوب است. پارامتر شیلدز بحرانی حداقل تنش برشی مورد نیاز برای بلند کردن ذرات رسوب از سطح مشترک سیال و بستر فعال را نشان می‌دهد (Wei, 1992).

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_L - \rho_s)d} \qquad \text{(۳-۷)}$$

در رابطهٔ فوق، θ_{cr} پارامتر شیلدز بحرانی و τ_{cr} تنش برشی جریان در آستانهٔ حرکت ذرهٔ رسوب است. هدف از بسط و تشریح این مدل، تخمین و پیش‌بینی مقدار جریان رسوباتی است که از روی بستر مشترک فرسایش یافته‌اند. بهمین منظور پارامتر سرعت برشی $\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$ برای اندازه‌گیری قدرت کف‌کنی جریان تعریف و لذا سرعت کنده‌شدن رسوبات از بستر(u_{lift}) را می‌توان مطابق رابطهٔ زیر ارائه کرد:

$$u_{lift} = \alpha n_s \sqrt{\frac{\tau - \tau_{cr}}{\bar{\rho}}} \qquad \text{(۳-۸)}$$

که در آن n_s بردار نرمال سطح بستر، $\propto$ پارامتر بی‌بعد معرف احتمال کنده شدن ذرات رسوب از بستر است که معمولاً برابر ۱ یا کمتر فرض می‌شود. زاویهٔ استقرار طبیعی رسوبات در این مدل از رابطهٔ ای حاصل می‌شود که در آن n بردار نرمال سطح و g بردار جاذبه است (موحدی ۱۳۹۲). در جریان ساکن زاویهٔ اصطکاک داخلی ذرات رسوب میزان حداقل شیبی که طی آن دیواره‌های حفرهٔ آبشستگی می‌تواند پایدار بماند را تعیین می‌کند. زاویهٔ اصطکاک داخلی بالای رسوبات مانند رس، نشان از پایداری دیواره در شیب تند دارد. در زوایای پایین مانند ماسه، دیواره تمایل بسیار برای ریزش و حرکت به جلو دارد.

$$\theta = \frac{n}{|g|} \qquad \text{(۳-۹)}$$

تنش برشی بحرانی سطح شیبدار مؤثر در آبشستگی بستر در نرم‌افزار Flow-3D با تأثیر زاویهٔ اصطکاک داخلی رسوبات که جزء ورودی مدل است توسط رابطهٔ زیر ارائه می‌شود (Flow3D manual, 2012):

$$\tau_{cr} = \tau_{cr}^{0}\sqrt{1-\frac{sin^2\varphi}{sin^2\xi}} \qquad (۱۰-۳)$$

مطابق رابطهٔ فوق هنگامیکه شیب طبیعی رسوبات با زاویهٔ اصطکاک داخلی آنها برابر شود($\varphi = \xi$)، تنش برشی بحرانی برابر صفر شده($\tau_{cr} = 0$) و بدین معنی است که سطح بستر در اثر هر نوع تنش برشی وارده دچار فرسایش می‌شود. همچنین هنگامیکه ($\varphi > \xi$) باشد، مقدار($\tau_{cr} < 0$) بوده و بدین معنی است که رسوبات بدون وجود تنش برشی هم دچار فرسایش می‌شوند. رابطهٔ فوق همچنین نشان می‌دهد هرچه زاویهٔ اصطکاک داخلی ذرات رسوب بزرگ‌تر شود، دیوارهٔ حفرهٔ آبشستگی درصورتی بدون وجود تنش برشی دچار فرسایش می‌شود ($\tau_{cr} = 0$) که شیب دیواره φ بزرگترشود (امیر اصلانی و همکاران ۱۳۸۷). حرکت رسوبات معلق در سیستم بوسیلهٔ معادلهٔ همرفت- پخش بیان می‌شود، بگونه‌ای که با اضافه کردن جمله‌های ته‌نشینی (Drifting) و بلند شدگی (Lifting) رسوب، معادلهٔ مذکور مطابق رابطهٔ زیر می‌باشد:

$$\left(\frac{\partial c_s}{\partial t}\right)_x + u.\nabla c_s = D\nabla^2 c_s - u_{lift}.\nabla c_s - u_{drift}.\nabla c_s \qquad (۱۱-۳)$$

که در آن، U سرعت محلی سیال (جریان) و u_{lift} و u_{drift} بترتیب سرعت‌های مربوط به بلند شدگی و ته‌نشینی رسوبات می‌باشند. در مجموع مدل آبشستگی در Flow-3D از یک رویکرد مستقیم و آسان برای مدل‌سازی فرسایش و رسوبگذاری در جریان سه‌بعدی بهره می‌برد. شبیه‌سازی انجام شده نشان می‌دهد که عمق چالهٔ آبشستگی در حالت تعادل بخوبی با نتایج تجربی همخوانی دارند. محدودیت‌های مدل آبشستگی در نسخه‌های قبلی این نرم‌افزار وجود دارد در نسخهٔ جدید (v.10.0.3) برطرف شده است. در این محدودیت‌ها، ذرات درشت رسوب نمی‌توانند بدرستی شبیه‌سازی شوند؛

زیرا فرضیات حاکم بر بخش ته‌نشینی مدل نقض می‌شوند. همچنین مدل نوعاً نیاز به مدل‌سازی بار بستر داشت که در آن ذرات رسوب بر روی بستر رسوبات متراکم غلطش یا لغزش دارند (تا این که در حین جریان سیال معلق شوند). همچنین برای بستر فرسایش‌پذیر فقط یک نوع ذره برای مدل تعریف بود (موحدی ۱۳۹۰).

۳-۴-۴-موارد کاربرد صنعتی نرم افزار Flow-3D

نرم افزار Flow-3D، می‌تواند برای موارد و مسائل بغرنج دینامیک سیالات در صنعت و تحقیقات نظیر مسائل هوا و فضا، مسائل مربوط به دریا، مهندسی هیدرولیک و ... مورد استفاده قرار گیرد. یافتن یک راه حل مناسب عددی جهت پرداختن به مسائل مربوط به هیدرولیک جریان با سطح آزاد از جمله مسائلی است که اهمیت زیادی دارد، چرا که برپا نمودن مدل فیزیکی برای حصول نتایج تجربی و آزمایشگاهی کاری وقت گیر و پرهزینه می‌باشد. در این رابطه نرم‌افزار Flow-3D یک نرم‌افزار پرقدرت برای مدل نمودن جریانات مشابه می‌باشد. ورود هوا در پرش هیدرولیکی و سرریزها، جریان اطراف پایه پل، تخریب سد، کنترل پرش هیدرولیکی، جریان روی پله، جریان سرریز، ، امواج کم عمق و ... از نمونه‌های کاربردی در مهندسی هیدرولیک می‌باشد (Flow3D manual, 2012).

۳-۵-شرح مدل پایه های قربانی شونده در گروه پایه های استوانه ای

به منظور مدل‌سازی عددی بررسی پایه های قربانی شونده بر کنترل آبشستگی موضعی در گروه پایه های استوانه ای با استفاده از مدل عددی Flow3D از مدل آزمایشگاهی ارائه شده در مطالعات جاویدی وحدتی و حیدرپور در سال ۹۲ استفاده شده است. این مطالعات آزمایشگاهی با هدف بررسی آزمایشگاهی اثر بررسی پایه های قربانی شونده بر کنترل آبشستگی موضعی در گروه پایه های استوانه ای در شرایط مختلف انجام شده است. تجزیه و تحلیل بر روی یک فلوم آزمایشگاهی با طول مفید ۱۰، عرض ۴/ ۰ و ارتفاع ۶/ ۰ متر با کف افقی انجام شده است. جنس دیواره های آن از پلکسی

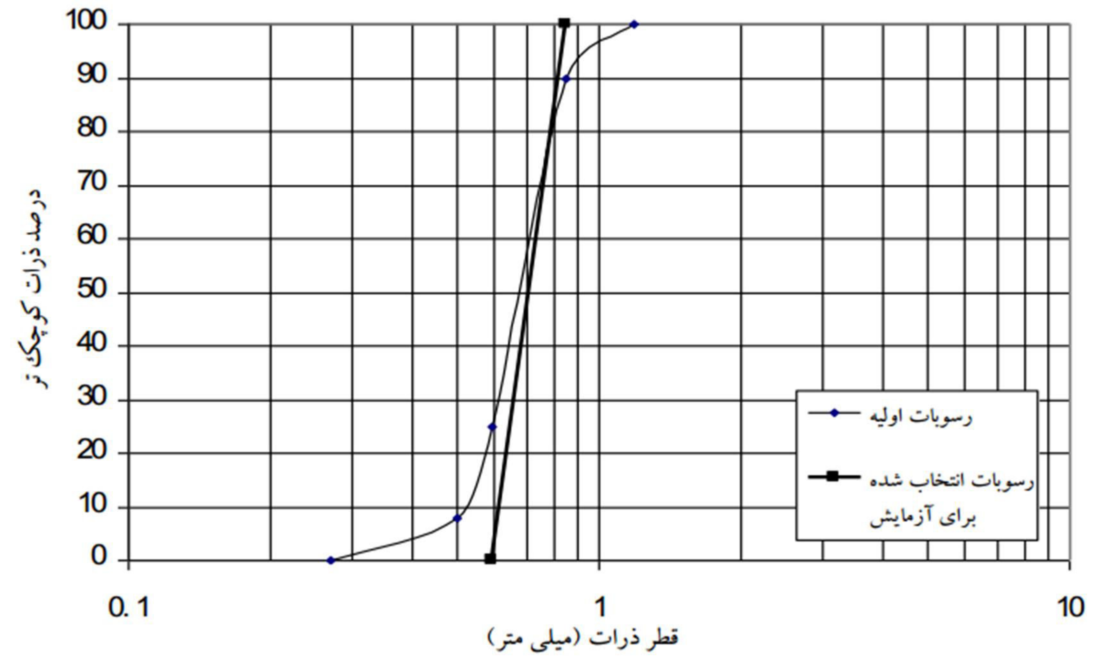
گلاس شیشه ای به ضخامت ۱۰ میلیمتر و کف کانال از جنس PVC به ضخامت ۱۰ میلیمتر ساخته شده و برروی خرپای فلزی نصب گردیده است. یک پمپ وظیفه انتقال آب را از مخزن اصلی به کانال عهده دار است که حداکثر دبی تامین شده توسط آن300لیتر بر ثانیه است. در این تحقیق تمام آزمایشات با دبی ثابت به میزان ۱۸ لیتر بر ثانیه انجام شده است. یک سرریز قابل تنظیم در پایین دست کانال وجود دارد که عمق آب در کانال به کمک آن تنظیم میشود. منطقه انجام آزمایشها دارای طول ۸/ ۱ متر و ارتفاع ۱۹/ ۰ متر میباشد. این منطقه از ابتدای کانال ۳ متر فاصله داشته و در بالا دست و پایین دست این منطقه به طول ۱ متر سکوهایی از جنس تفلون به ضخامت ۲ سانتی نصب شده که رویه ی آن همتراز سطح بستر خاک می باشد. در شکل زیر مشخصات هندسی و محل قرار گیری مصالح بستر و پایه پل نشان داده‌شده است [۴۴] .

شکل ۳-۱: مشخصات مدل آزمایشگاهی در مطالعات حیدرپور و همکاران در سال ۱۳۹۲

برای از بین رفتن تأثیر دیواره‌های کانال روی آبشستگی موضعی در اطراف پایه طبق معیاری که توسط

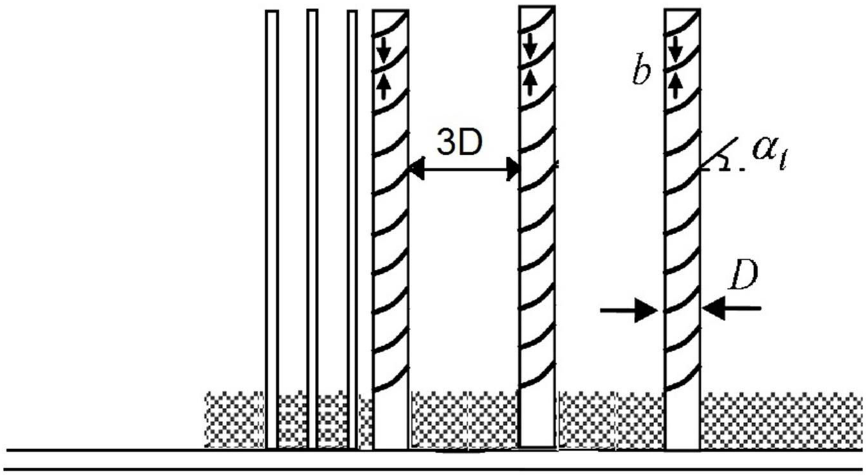
اتما و رودکیوی (۱۹۸۳) بیان شده است حداقل نسبت عرض کانال به عرض پایه باید ۶/۲۵ باشد. با توجه به عرض محدوده‌ی کانال و آرایش انتخاب شده برای گروه پایه‌ها قطر پایه ها برابر ۳۰ میلیمتر انتخاب شده است.

تشکیل ریپل ها در رسوبات غیر چسبنده با اندازه متوسط ۰/۵ تا۰/۷ میلیمتر اتفاق می افتد که باعث ایجاد برجستگیهای کوچک مجزا از هم در بستر میگردد. با تشکیل ریپل ها، عمق آبشستگی از عمق آبشستگی ماکزیمم کمتر می شود. دلیل این مطلب این است که چون سرعت جریان بیشتر از سرعت بحرانی آستانه حرکت رسوبات می باشد بنابراین مقداری از رسوبات شسته و حمل شده از بالادست وارد گودال آبشستگی شده و باعث کم شدن عمق آبشستگی نسبت به مقدار ماکزیمم خود میشود. از این رو برای حصول حداکثر عمق آبشستگی باید از تشکیل ریپل ها جلوگیری شود و بدین منظور قطر متوسط رسوبات باید از ۰/۷ میلیمتر بزرگتر باشد. برای حذف تاثیر اندازه ذرات رسوب بر عمق آبشستگی همچنین نسبت عرض پایه به قطر متوسط ذرات رسوب b/d_{50} باید بزرگتر از ۲۰ تا ۲۵ باشد. بر این اساس از یک نوع ماسه ریخته گری گرد گوشه با چگالی نسبی ۲/۶۵ استفاده شد این رسوبات دارای قطر بزرگ تر از ۰/۵۹ و کوچکتراز ۰/۸۵ میلی متر که دارای $d_{50} = 0.7\ mm$ هستند. منحنی دانه بندی رسوبات اولیه رسوبات انتخاب شده برای ازمایش در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۳-۲: منحنی دانه بندی مشخصات مصالح بستر در مطالعات حیدرپور و همکاران در سال ۱۳۹۲

لازم به ذکر است گروه پایه ها شامل گروه پایه های دوتایی و سه تایی با فاصله سه برابر قطر پایه در کانال قرار داده شدند که در شکل زیر نشان داده شده اند.



شکل ۳-۳: مشخصات پایه ها به همراه پایه های قربانی شونده در مطالعات آزمایشگاهی

پایه ها قربانی شونده براساس الگوی مثلثی شکل[1] در این مطالعه مد نظر قرار گرفته اند. لازم به ذکر است در مطالعات Chang and Karim، Hadfield 1997، Park et al. 2015، Melvil et al. 2000 قبلی همانند مناسب ترین الگوی چیدمان پایه های قربانی شونده به صورت مثلثی شکل تایید شده است. از نظر فیزیکی نیز این چیدمان سبب شکاف هسته جریان برخوردی قبل از رسیدن پایه اصلی می شود و در این نوع چیدمان جریان از وجه های پایه های قربانی شونده به سمت دیواره هدایت می شود و حداقل آشفتگی ایجاد شده می تواند جریان اصلی در کانال را از پایه اصلی منحرف نمایید به

[1] Triangular Array

این علت می تواند تاثیر مناسب تری در کاهش عمق آبشستگی نیز ایفا نماید. از نظر کاربردی نیز الگوی چیدمان مثلثی در شرایطی که مواد و قطعات معلق در جریان همانند الوارهای چوبی وجود داشته باشند می تواند نسبت به سایر چیدمان ها می‌توان به راحتی عبور نمایند و سبب انسداد جریان در این ناحیه نشوند.

لازم به ذکر است با استفاده شرایط چیدمان فاصله پایه ها قربانی شونده از یکدیگر و فاصله آن تا پایه اصلی بر اساس مطالعات دقیقی که در این موضوع توسط Melvil et al. 2000 و Göğüş 2006 & Kayatürk انجام شده است انتخاب گردیده است. همچنین ، شرایط قرارگیری پایه‌ها بهترین عملکرد را در کاهش عمق آبشستگی در مجاورت پایه اصلی رخ خواهد داد. بر این اساس در گروه پایه دوتایی و با فاصله سه برابر قطر در سرعتی معادل ۰/۸۸ سرعت بحرانی ($0.88V_c$) و با ۵ پایه قربانی شونده به قطر 1/6 قطر پایه های اصلی معادل ۵ میلیمتر که به آرایش مثلثی شکل در جلوی پایه اول قرار گرفته اند و فاصله راس مثلث تا جلوی پایه اول برابر با (2.5b) و فاصله آن تا قاعده مثلث برابر با (2b) و همچنین زاویه راس مثلث ۳۰ درجه می باشد به همراه کابل پیچی دور پایه ها با کابلی به قطر 10درصد قطر پایه و زاویه پیچش ۱۵ درجه انجام شد. لازم به ذکر است کابل های دور پیچ بر اساس مطالعات Izadnia and Heidarpour در سال ۲۰۱۲ انتخاب شده است [۴۰].

۳-۶- شبیه‌سازی هندسی پایه‌های دایره‌ای پل و بستر فرسایش‌پذیر در مدل‌سازی عددی جریان و آبشستگی پایه پل

شبیه‌سازی عددی میدان جریان در اطراف پایه‌های پل‌ها در مسیر رودخانه‌ها و بررسی مقدار آبشستگی و فرسایش بستر نواحی اطراف آنها به منظور راهکارهای طراحی این گونه سازه از اهمیت بسزایی برخودار می‌باشد. تجربه محققین در زمینه این گونه شبیه سازی‌ها نشان داده است که در بین بسته‌های نرم افزاری موجود، نرم افزار Flow-3D قابلیت بهتری در مدل نمودن این نمونه از سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد. در این مطالعه به منظور بررسی عددی میدان جریان در اطراف پل‌ها از نرم افزار

Flow-3D (ver.10.1) استفاده شده است. شبیه سازی عددی در این نرم افزار بر اساس مدل آزمایشگاهی انجام شده صورت گرفته است. در ادامهٔ این بخش هندسه مدل‌های آزمایشگاهی با ایجاد شرایط مدل سازی عددی یکسان و مشابه با مدل هیدرولیکی ساخته شده، ساخته می‌شود و پارامترهای هیدرولیکی میدان جریان بر روی این نوع سازه مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. در این مطالعه نمونه‌ای از پایه استوانه ای پل‌های برای انجام مطالعات سه‌بعدی شبیه‌سازی میدان جریان انتخاب شده است مشخصات هندسی کانال بر اساس یک کانال مستطیلی فرسایش‌پذیر در ادامه ارائه می‌گردد.

۳-۶-۱-شبیه‌سازی هندسی پایه‌های دایره‌ای و بستر فرسایشی

برای مدل سازی مدل هیدرولیکی پایه پل مستقر در رودخانه در نرم افزار Flow-3D، بستر فرسایشی[1] کانال به‌صورت سه بعدی باید توسط یک نرم افزار شبیه ساز هندسی همانند AutoCAD، CATIA، SoliWorks و.... ساخته شود. به همین منظور در این پژوهش از نرم افزار SolidWorks 2011 استفاده شده است.

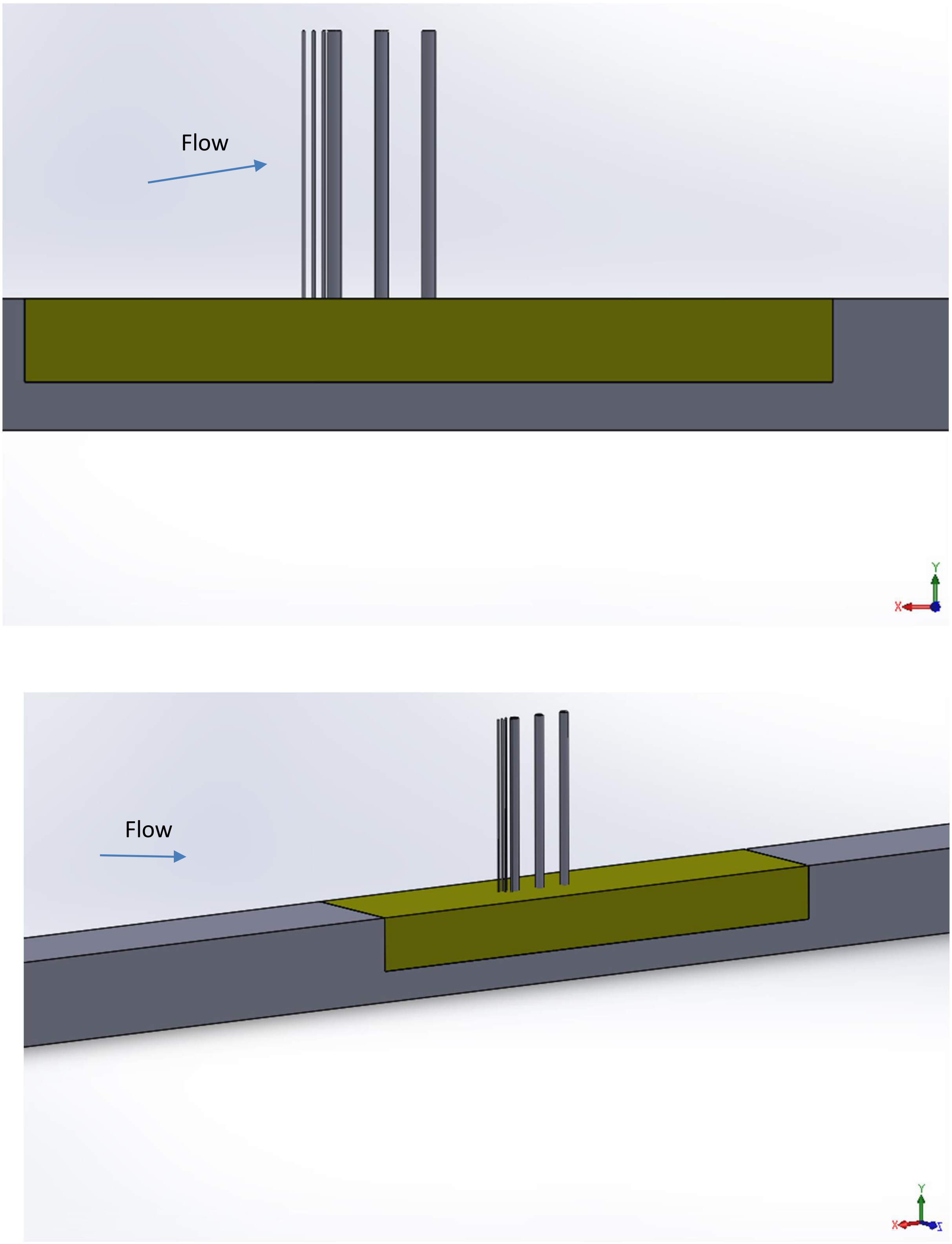
نرم افزار Solidworks یک نرم افزار قدرتمند در زمینه‌ی طراحی وخصوصاً طراحی سه‌بعدی است. در این نرم افزار بخش‌های مجزایی برای مدل سازی و عملیات ورق کاری و جوش‌کاری و ریخته‌گری و قالب سازی و همچنین تحلیل تنش و مدل‌سازی رفتار و مقاومت قطعه تحت بار گذاری‌های گوناگون وجود دارد. ویژگی برجستهٔ این نرم افزار در مقایسه با نرم‌افزارهای مشابه برخورداری از محیط ساده و آسان می‌باشد. علی‌رغم سادگی و سهولت کاربرد این نرم‌افزار دارای توانای چشم‌گیر در زمینهٔ طراحی است. به همین منظور از نرم‌افزار SolidWorks 2011 به منظور شبیه‌سازی هندسی پایه پل‌ها و بستر فرسایشی استفاده شده است. مدل ساخته شده در نرم‌افزار عددی، براساس مطالعات

---

[1] Erosion bed sediment

آزمایشگاهی می‌باشد و در ادامه تمام مراحل کالیبراسیون و صحت سنجی مدل عددی بر مبنای نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

مدلی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت، در نرم افزار SolidWork بصورت سه‌بعدی رسم شده‌اند که در زیر شمایی از بستر فرسایشی و جانمایی پایه‌های دایره‌ای پل‌ها بر روی این بستر رسوبی نشان داده شده است.



شکل ۳-۴: شبیه سازی هندسه سه‌بعدی کانال جریان، بستر رسوبی، پایه پل‌ها توسط نرم افزار SolidWork

۳-۷-جمع بندی

به طور کلی طراحی، محاسبه و احداث پایه‌های پل، از مهمترین و حساس‌ترین مراحل یک پروژه پل‌سازی می‌باشند. بخصوص وقتی که این پل در محل عبور یک رودخانه واقع شده باشد. در این زمان، طراح باید برای انتخاب طول و تعداد دهانه‌ها و عمق حداقل پی پایه‌ها، اطلاعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی منطقه را در نظر گرفته، مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. از مهمترین مواردی که در این رابطه می‌توان به آن اشاره نمود، اطلاعات مربوط به فرسایش بستر رودخانه می‌باشد که در صورت در نظر نگرفتن آن، بایستی شاهد عواقب خطرناکی از جمله تهدید پایداری پل و نهایتاً خرابی و ناپایداری را در پی داشته باشد. لذا به جهت یک طراحی مناسب و ایمن، به خصوص در رابطه با رودخانه‌های سیلابی با بستر قابل فرسایش، استفاده از روش‌های کاربردی برای تعیین عمق آبشستگی و در نتیجه تعیین وضعیت بهینه از جهت نوع و محل قرارگیری پایه‌ها، توصیه می‌گردد.

در ازاء محدودیت های ناشی از زمان و هزینه، مدلسازی سه بعدی جریان در این مورد استفاده قرار گرفته تا کنار قابلیت های فراهم شده بتوان به نتایج و کاربردهای بیشتری از اینگونه طرح‌ها نائل شد. از مدل عددی Flow3D سه بعدی جهت شبیه سازی میدان جریان در این نوع سازه‌ها در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی می‌توان بهره جست که لزوم آن تعیین دقیق پارامترها و معادلات لازم جهت شبیه‌سازی می باشد. بر همین اساس در این فصل سعی شد کلیه معادلات حاکم بر جریان و مدل آبشستگی که توسط نرم افزار Flow3D استفاده می‌شود به طور کامل معرفی و تعیین شوند. در این فصل نیز مدل هندسهٔ سازهٔ پل و بستر فرسایش‌پذیر که در این پژوهش انتخاب شده‌اند توسط نرم افزار SolidWork شبیه‌سازی شدند.

فصل چهارم

تحلیل و بررسی نتایج

مدلسازی عددی

۴-۱-مقدمه

به منظور شبیه‌سازی و بررسی عددی تاثیر پایه های قربانی شونده بر کنترل آبشستگی موضعی در گروه پایه های استوانه ای با استفاده از مدل عددی Flow3D ، ابتدا در این فصل بخش‌های مختلف مراحل شبیه‌سازی با استفاده از مدل عددی Flow3D ارائه خواهد شد و سپس پس از آماده سازی مدل عددی با استفاده از نتایج مدل فیزیکی مورد استفاده در این مطالعه کالیبراسیون و صحت سنجی مدل عددی انجام می‌گیرد. سپس با استفاده از شرایط مختلف اثر آبشستگی پایه پل‌ها با مقاطع دایروی به همراه پایه های قربانی شونده با استفاده از مدل عددی Flow3D مشخص می‌گردد.

۴-۲-مراحل شبیه‌سازی تاثیر پایه های قربانی شونده بر کنترل آبشستگی

به منظور شبیه‌سازی جریان در بستر فرسایش پذیر در محیط مدل عددیFlow-3D ver.10.1 بر اساس تنظیمات صورت گرفته توسط کاربر بایستی به ترتیب پنج مرحله Navigator، Model Setup، Simulate، Analyze و Display انجام گیرد. البته لازم به ذکر است که کلیه اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی را می‌توان به‌صورت فایل متنی نیز وارد کرد که برای سهولت کار امکانات ورود اطلاعات به‌صورت گرافیکی وجود دارد. به همین منظور در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی جریان تنظیمات مدل عددی به‌صورت زیر اجرا گردیده است.

۴-۲-۱-بخش اول Naviagtor

در این بخش می‌توان در یک زمان چندین شبیه‌سازی، شامل مدل‌های مختلف را راه اندازی و مورد حل قرار داد و نتایج پردازش‌های آنها را مشاهده نمود. به این ترتیب می‌توان شبیه‌سازی مورد نظر را ایجاد و یا شبیه سازی موجود را در این محیط فراخوانی نمود. شبیه‌سازی‌ها در پوشه های ویژه‌ای به نام Workspace قرار می‌گیرند. این پوشه برای سهولت کارهای کاربر است. شامل مجموعه-ای از شبیه‌سازی‌هاست که شبیه‌سازی‌های جدید می‌تواند به یک Workspace در جایی که تدوین و

تغییر می‌یابد، اضافه شود. تمامی شبیه‌سازی‌ها در یک Workspace می‌تواند به‌صورت پی‌درپی و متوالی اجرا شوند.

۴-۲-۲-بخش دوم Model Setup

در این بخش کلیه اطلاعات لازم برای مدل سازی یک شبیه‌سازی به نرم افزار داده می‌شود که شامل هشت بخش مجزا می‌باشد:

۱- بخش General

این بخش شامل موارد زیر است:

- زمان اتمام محاسبات (finish time)
- شرایط پایان دادن به محاسبات (Finish condition)
- شرایط محیط تداخلی(Interface tracking)
- حالت سیال به دو شکل تراکم پذیر و یا تراکم ناپذیر(Flow mode)
- تعداد سیالات[1](Number of fluids)
- گزینه‌های اطلاع رسانی[2] (Mentor option)
- واحدها (Units)
- گزینه‌های موجود مربوط به انتخاب نسخه‌های مختلف نرم افزار (Version option)

۲- بخش Physics

در این بخش ویژگی‌های مختلف سیال به لحاظ ماهیتی وارد می‌شود.

- لزجت (Viscosity) که شامل حالت‌های سیال غیر لزج و سیال لزج می باشد. سیال لزج خود می‌تواند از الگوی جریان آرام تبعیت کند یا از مدل‌های مختلف آشفتگی استفاده

[1] لازم به ذکر است که نرم افزار هوا را به عنوان پیش فرض به عنوان یک سیال شناخته و نبایست در شمارش سیالات در نظر گرفته شود.

[2] بهترین حالت آن ارائه پیشنهادات لازم توسط خود نرم افزار است (offer suggestion).

شود. لازم به ذکر است در شبیه‌سازی جریان اطراف پایه‌های پل‌ها، مدل آشفتگی RNG انتخاب شده است.

- شتاب ثقل (Gravity) که مقدار شتاب ثقل را می‌توان در هر یک از راستاهای x,y,z وارد کرد. با توجه به شتاب گرانش در این مدل مقدار ۹/۸۱- در جهت z اعمال شده است.
- برش دیواره (Wall Shear) که با انتخاب سیال لزج به طور خودکار فعال می‌شود.
- کاویتاسیون (Cavitation) که با فعال شدن این گزینه کاربر باید مقدار متغیر فشار کاویتاسیون را به مدل عددی اعمال نمود.

موارد مختلف دیگری که در این بخش قابل تعریف هستند عبارتند از: آبشستگی رسوب (Sediment Scoure)، ورود هوا (Air entrainment) ، انتقال گرما (Heat transfer) و ... که در موارد مورد نیاز بایستی به مدل اضافه گردند.

۳- بخش Fluids

در این قسمت مقادیر عددی خواص فیزیکی سیال نظیر ویسکوزیته (Viscosity)، جرم حجمی (Density)، تراکم پذیری (Compressibility)، کشش سطح (Surface Tension)، مشخصات گرمایی (Termal Properties) و ... وارد می‌شود.

کلیه موارد فوق را می‌توان به‌صورت دستی وارد کرد، اما می‌توان از یک بخش پایگاه اطلاعات سیال (Fluid Database) نیز استفاده کرد که در آن خواص فیزیکی سیالات در دماهای گوناگون موجود است. این مقادیر در سیستمهای متفاوت CGS ، SI و سیستم انگلیسی وجود دارند که با اجرای (Load) هر یک می توان به طور خودکار تمام مشخصات فیزیکی سیال مورد نظر را به مدل وارد نمود. در این شبیه‌سازی سیال مورد نظر آب در دمای ۲۴ درجه در نظر گرفته شد.

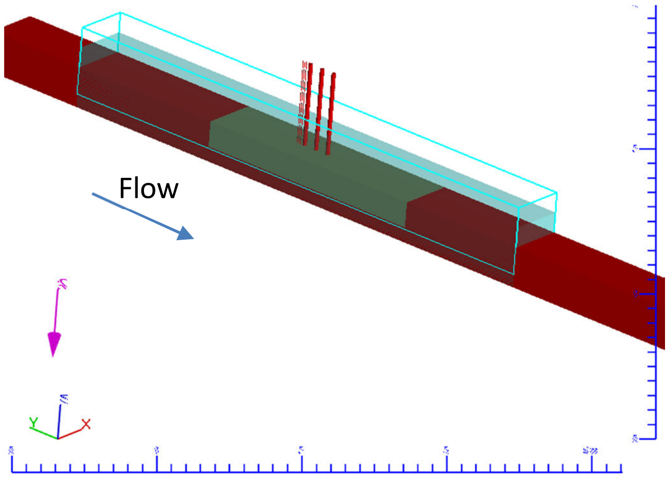
۴- شبکه بندی و هندسه پایه‌ها و فلوم جریان (Meshing & Geometry)

الف – شبکه بندی

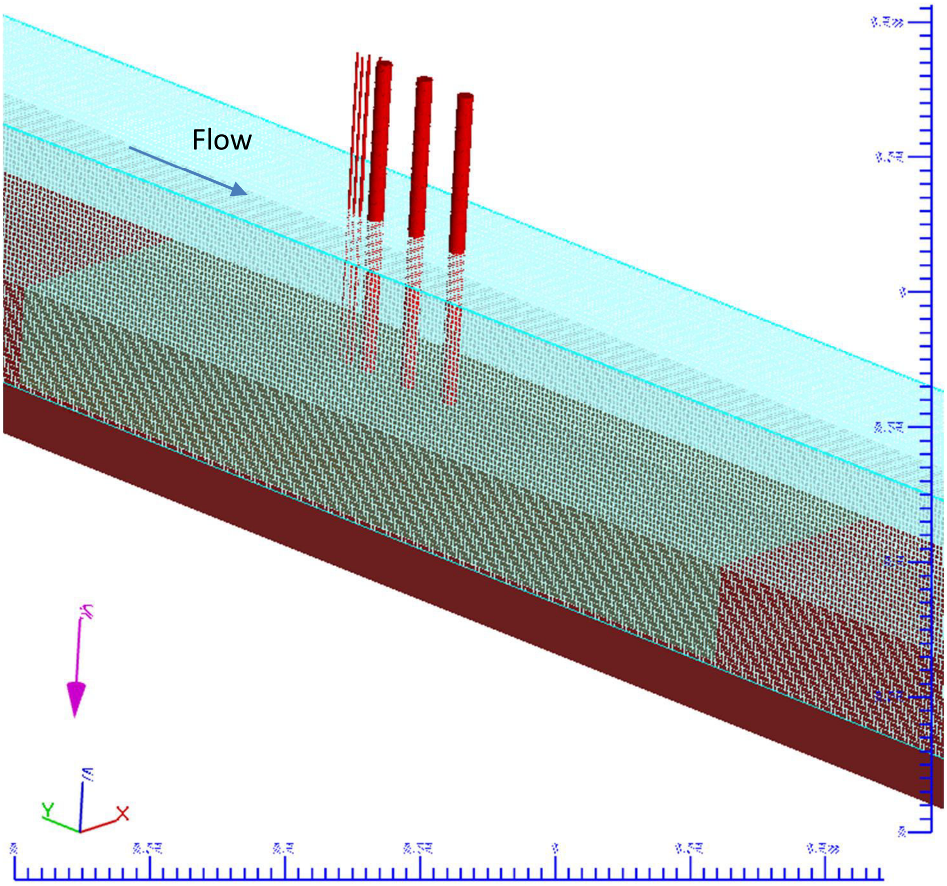
برای مشخص کردن شبکه بندی، بلوکهایی مشخص می‌شود که کلیه اندازه‌های سازه مورد نظر و فضای آزاد در داخل آن تعریف می‌شود. می‌توان همه جزییات سازه مورد نظر را در یک بلوک هم در نظر گرفت. سیستم مختصات می‌تواند از نوع کارتزین یا استوانه‌ای باشد. مختصات شبکه، با استفاده از سیستم مختصات کارتزین در داخل بلوک شبکه بندی در جهات سه گانه با استفاده از یک سری نقاط ثابت (Fixed Pt(i)) تعریف می شوند. برای مشخص کردن اندازه شبکه بین هر دو نقطه ثابت می‌توان تعداد سلول‌های مورد نظر یا اندازه سلول‌ها را اعمال نمود.

ب- هندسه

کل فضایی که توسط بلوک ایجاد می‌شود و در قسمت شبکه بندی به شبکه‌های با اندازه مشخص تقسیم می‌شود، در سر فصل‌های مشخص سازه نقاط ثابت خود را دارد؛ اما برای ایجاد سازه مورد نظر به‌صورت فیزیکی از موانعی به نام Obstacle استفاده می‌شود. با اضافه کردن یک مانع با مختصات مشخص در داخل بلوک، در واقع به مدل تفهیم می‌شود که این بخش به عنوان سدی در برابر جریان سیال عمل می‌کند. باید توجه داشت که برای عملکرد صحیح مانع‌ها، باید در محل تعریف مختصات مانع، گزینه Solid انتخاب شود. در شکل زیر هندسه صلب ساخته شده در فصل قبل به مدل عددی Flow3D اضافه گردیده است و با استفاده از بلوک‌های شبکه بندی و فضای محاسباتی برای پایه پل‌ها با مقاطع دایروی و بستر فرسایش پذیر در مدل عددی Flow3D ایجاد شده است.



شکل ۴-۱: بلوک شبکه بندی پایه پل‌ها با مقاطع دایروی و بستر فرسایش پذیر در مدل عددی Flow3D



شکل ۴-۲: سلول‌های محاسباتی بر روی بلوک شبکه بندی بستر در مدل عددی Flow3D

بخش مرزها (Boundary)

در مختصات کارتزین برای تعریف شرایط مرزی شش وجه مشخص وجود دارد که با توجه به جهت مثبت محورها شامل X Min, X Max, Y Min, Y Max, Z Min, Z Max می‌باشد. لازم به ذکراست که کلیه این مشخصات در یک بلوک تعریف می‌شوند و چنانچه چند بلوک داشته باشیم برای هریک شرایط مرزی جداگانه‌ای باید تعریف شود. مکانیزم اعمال شرایط مرزی به هر یک از وجوه چنان است که بعد از نسبت دادن هریک از حالات به یک وجه کلیه ورودی های سلول‌های آن وجه در معادلات با شرط مرزی فوق وارد می‌شوند و این در زمان های مختلف حل معادلات و اجرای نرم افزار ثابت است.

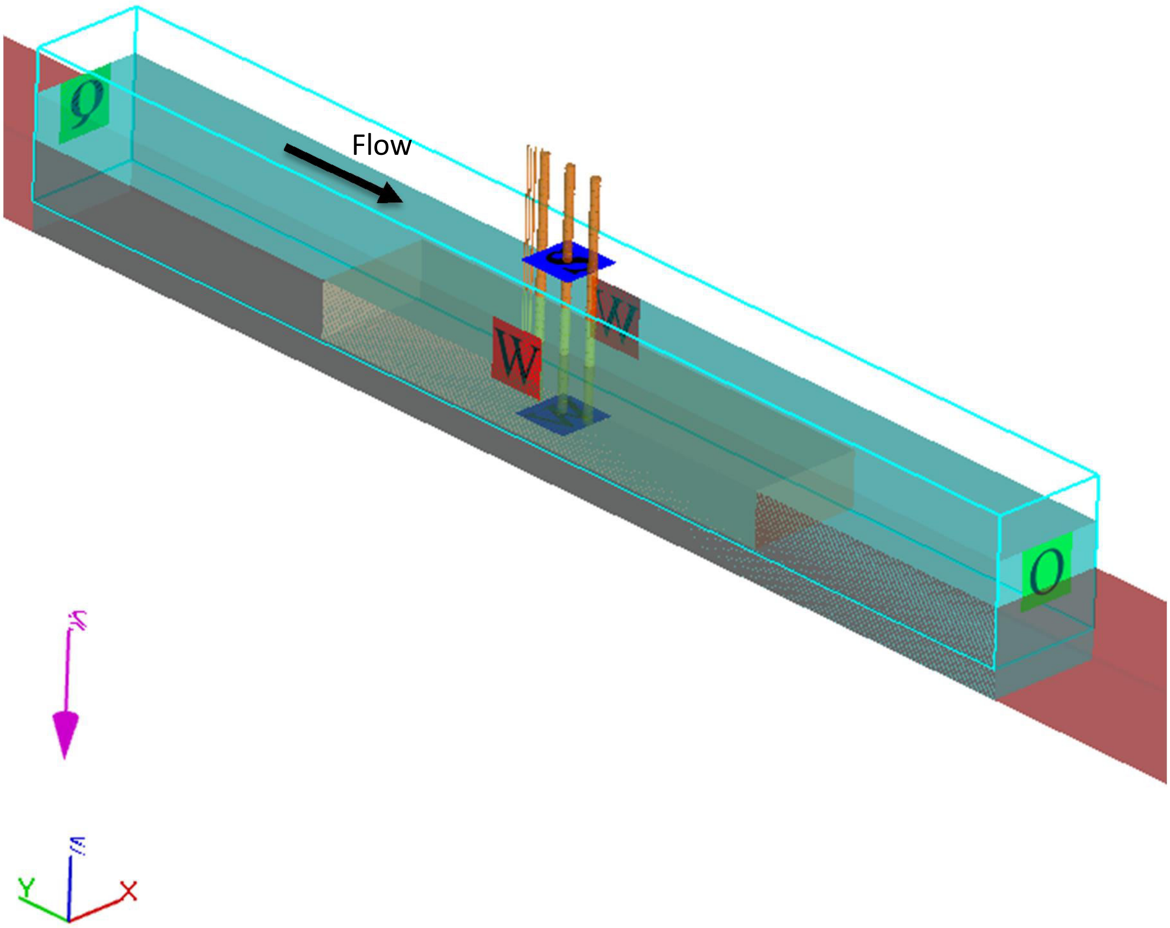
حالات مختلف شـــرایط مرزی شامل فشار ثابت (Specified Pressure)، ســرعت ثابـت (Specified Velocity) ، شرایط مرزی خروجی (Out Flow)، شرایط مرزی دیوار (Wall)، شرایط مرزی متقارن (Symmetry)، شرایط مرزی متناوب (Periodic)، شرایط مرزی پیوسته (Continative)، پوشش شبکه (Grid Overlay)، موج (Wave) و نرخ حجم سیال (Volum flow rate) می‌باشد.

فشار را می‌توان به‌صورت مقدار فشار (pressure) یا به‌صورت فشار ایستایی (stagnation pressure) تعریف کرد؛ همچنین می‌توان مقدار سیال را به‌صورت درصد سهم سیال (F fraction) یا به‌صورت ارتفاع سیال (Fluid Height) برای نرم افزار مشخص کرد. سرعت سیال را در هر سه جهت می‌توان در نرم افزار وارد کرد. همچنین برنامه قابلیت دریافت هر یک از پارامترهای فوق را به‌صورت سری زمانی نیز داراست.

اعمال شرایط مرزی موجود در مدل‌های عددی بر اساس شرایط آزمایشگاهی موجود بایستی به مدل عددی معرفی گردد. به همین علت در شرایط مرزی بلوک شبکه بندی ایجاد شده است. در این مدل عددی نیز شرایط مرزی کاملاً مشابه به شرایط آزمایشگاهی انتخاب گردید. شرایط مرزی کف Zmin کانال نیز همانند جداره‌ها در مدل آزمایشگاهی از جنس بستر فرسایش پذیر با ابعاد رسوب ۰/۷

میلیمتر استفاده گردیده است. به منظور اعمال شرایط مرزی برای وجه Zmax در مدل عددی با توجه به اینکه در مدل آزمایشگاهی جریان دارای سطح آزاد و در تماس مستقیم با هوا می‌باشد بایستی شرایط مرزی برای این وجه از Symmetry یا شرایط تقارن استفاده شود که در این صورت گردیان تغییرات فشار هوا در داخل و خارج صفر در نظر گرفته می‌شود و از آنجایی که در مدل Flow3D نیازی به تعریف فاز هوا به عنوان یک فاز جدید در مسائل هیدرولیکی نمی‌باشد، شرایط سطح آزاد جریان و تماس مستقیم با فشار نسبی هوا کاملاً برقرار می‌گردد.

به منظور انتخاب و اعمال صحیح شرایط مرزی ورودی و خروجی جریان در مقاطع Ymin و Ymax نیز بر اساس مطالعات آزمایشگاهی بایستی یک جریان پایدار با ارتفاع مشخصی از سیال به مدل عددی معرفی گردد بنابراین با استفاده از شرایط مرزی موجود در مدل عددی Flow3D در این بخش مقادیر مختلف ارتفاع سیال برای وجه Ymin؛ با شرایط مرزی دبی جریان (Volume Flow Rate) اعمال می‌گردد که دقیقاً منطبق بر مطالعات آزمایشگاهی است. از طرف دیگر پس از عبور جریان از روی بستر فرسایش پذیر که کانالی مستطیلی در آن تعبیه شده است، بایستی به مرز خروجی و به بیرون از مدل عددی هدایت شود که جریان خروجی در پایین دست همانند شرایط مدل هیدرولیکی به‌صورت Outflow اعمال گردیده است. کلیه شرایط مرزی اعمال شده به‌صورت شکل زیر نشان داده‌شده است.



شکل ۴-۳: شرایط مرزی اعمال شده در شبیه سازی جریان بر روی مدل عددی پایه پل و کانال شبیه‌سازی آبشستگی بستر در Flow3D

بخش شرایط اولیه (Initial)

این بخش از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است:

- حالت اولیه سیال (Fluid Initial State) که شامل مقادیر اولیه سرعت در هـر سـه جهـت مختصات، همچنین مقدار اولیه دمای سیال و غیره را می‌شود.
- حالت اولیه فشار (Initial Pressure State) که می توان مقدار اولیـه فشـار را در صـورت فشار یکسان در آن مشخص کـرد یـا فشـار را بـه‌صـورت هیدروسـتاتیک در هـر یـک از راستاهای مختصاتی x,y,z در نظر گرفت.
- حجم (Volume) که می توان حجم اولیه سیال یا ارتفاع آب در جهت z را مشخص کرد.

- حالت اولیه فضای خالی (Void Initial State) که دما و فشار اولیه فضای خالی را شـامل می‌شود.
- قسمت اضافه کردن محدوده برای سیال (Add) است که در آن می توان فضای اولیه پـر شده با سیال را در فضای بلوک مشخص کرد؛ همچنین محل قرار گرفتن شیرآلات و غیره را می‌توان در این قسمت تعیین نمود.

۵- بخش فایل خروجی (Output)

در این بخش ویژگی‌ها و امکاناتی برای داشتن مشخصات خاصی از نتایج ارائه می‌شود، از جمله حجم تقریبی فایل نتایج داده می شود که با انتخاب نمایش گزینه‌های مختلف نتایج حجم این فایل بزرگ می‌شود. همچنین در این زمان ذخیره سازی و نمایش نتایج در بازه‌های زمانی نیز قابل تنظیم است.

۶- بخش تنظیمات عددی (Numerics)

در قسمت اندازه گام‌های زمانی (Time Step Size) می‌توان حداقل، حداکثر هر گام زمانی و اندازه گام زمانی اولیه را مشخص کرد. در قسمت تکرارهای میدان فشار (Pressure Iteration) می توان گزینه GMRES را فعال نمود یا در هرکدام از جهات x,y,z میدان فشار را به‌صورت ضمنی (Implicit) حل نمود. همچنین مقدار همگرایی را می‌توان معین کرد.

برای تنش ویسکوز، هدایت گرمایی و آب کم عمق (Shallow Water) امکان انتخاب بین حل صریح یا ضمنی وجود دارد .در بخش جابجایی مومنتوم (Momentom Advection) می‌توان گزینه-های حل درجه اول (First Order) و درجه دوم (Second Order) را انتخاب نمود.

قسمت گزینه های حل کننده جریان سیال حاوی موارد متعددی است که گزینه حل تمام ابزار انتقال جریان (Solve All Fluids Transport Equipment) از آن جمله است. در پایان کار تعیین مشخصات مدل ورودی، تمام موارد ورودی ذخیره می گردد و برنامه آماده حل می‌باشد.

۴-۲-۳-شبیه‌سازی (Simulate)

در این قسمت با اجرای گزینه Preprocessor در تب simulate واقع در menu bar، برنامه قبل از حل کنترل می‌شود و خطاها یا پیام‌هایی برای حل بهتر در آن مشخص می‌شود. بعد از برطرف شدن ایرادها با انتخاب گزینه solve محاسبات حل برنامه شروع می‌شود. چنانچه برنامه قادر به اصلاح مشکلات نباشد خود به خود محاسبات قطع می‌گردد. بعضی از پیغام ها در قسمت Diagnositics در Menu bar توضیح داده‌شده است.

با اجرای گزینه simulate، حل معادلات جریان توسط نرم افزار آغاز می‌شود. با توجه به حجم بالای سلول‌های مدل و تعداد زیاد معادلاتی که باید همزمان حل شوند، اجرای نرم افزار مدتی طولانی است. در حین اجرا منحنی های مختلفی برای مشاهده روند حل معادلات ارائه می شود که می‌توان از روی آنها نحوه پیشرفت حل را مشاهده کرد؛ از جمله این گراف‌ها که به طور همزمان نسبت به زمان رسم می‌شوند می‌توان به حد پایداری زمانی و اندازه گام‌های زمانی، درصد خطای حجمی، میانگین انرژی آشفتگی، حجم سیال و معیار همگرایی اشاره کرد.

۴-۲-۴-تحلیل نتایج (Analyse)

بعد از اجرای برنامه می‌توان نتایج خروجی را در گزینه Results مشاهده نمود . در صورتی که بخش موجود (Existing) انتخاب شود نتایج تشکیل شده به‌صورت کلی با نمودارهایی نمایش داده می‌شود. چنانچه بخش انتخابی (Custom) اجرا شود، می‌توان نتایج را به نحو دلخواه مشاهده کرد. گزینه های مختلفی برای مشاهده نتایج در این بخش وجود دارد که عبارتند از:

- بخش Custom : فایل متنی مدل است که به زبان مورد استفاده نرم افزار نوشته شده است.
- بخش Probe : در این بخش ویژگی‌های نقاط به طور مشخص نمایش داده‌شده است.
- بخش 1-D : نمایش نتایج به‌صورت یک بعدی است.

- بخش 2-D : نمایش نتایج به‌صورت دو بعدی است.
- بخش 3-D : نمایش نتایج به‌صورت سه بعدی است . در این بخش و دو بخش قبلی نتایج به‌صورت انیمیشن نمایش داده می‌شوند.
- بخش Text Outputs: متغیرهای مورد نظر را در بازه‌های زمانی و مکانی دلخواه به‌صورت فایل متنی می‌توان ذخیره کرد.
- بخش Nutrial file : متغیرهای مورد نظر در نقاط مورد نظر در یک فایل متنی داده‌شده، به‌صورت یک فایل خروجی ارائه داده خواهد شد.

۴-۲-۵-نمایش نتایج (Display)

در این بخش نتایجی که در مرحله قبل انتخاب شده اند، نمایش داده می‌شود. همچنین در این بخش می‌توان از فایل خروجی یک فایل انیمیشن ساخت و با تغییر شفافیت سیال و مانع، الگوی جریان در مدل شبیه‌سازی شده را نیز مشاهده کرد.

۴-۳-کالیبراسیون و صحت سنجی مدل‌سازی عددی

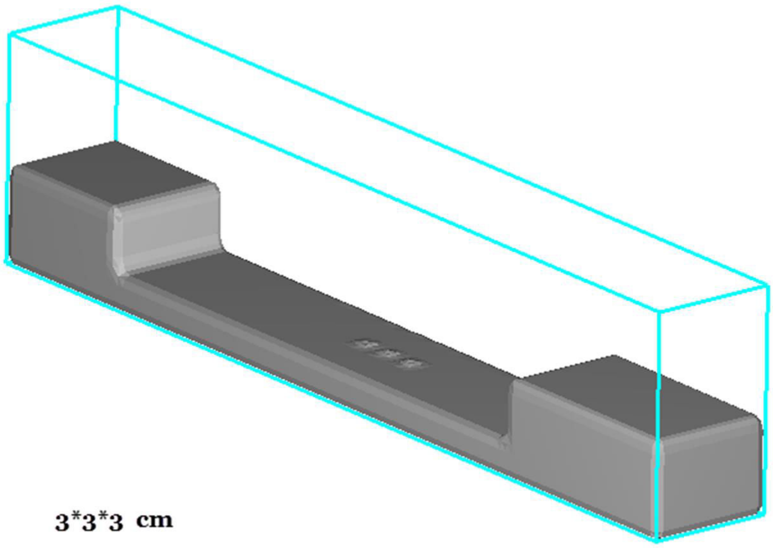
به منظور بررسی عددی تاثیر پایه های قربانی شونده بر کنترل آبشستگی موضعی در گروه پایه های استوانه ای با استفاده از مدل عددی Flow3D از مدل آزمایشگاهی جاویدی وحدتی و حیدرپور ۱۳۹۲ استفاده شده است. در مرحله کالیبراسیون و صحت سنجی نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی از مدل‌های پایه سه تایی با کابل همراه با پایه های قربانی شونده در وسط کانال استفاده شده است که بایستی نتایج حاصل از مدل‌سازی آبشستگی با نتایج مدل عددی مورد مقایسه قرار گیرد. در تمامی شبیه سازی‌های صورت گرفته در این مطالعه، میدان جریان سه‌بعدی به وسیله مدل آشفتگی RNG حل شده است. دلیل استفاده از این مدل آشفتگی را می‌توان در ویژگی‌های و مزیت آن نسبت به مدل‌هایی چون $k-\varepsilon$ دانست. این مدل به واسطه داشتن ترم اضافی در معادله ε برای تحلیل

جریانات سریعاً کرنش یافته و جریانات بر روی سطوح با تغییرات هندسی زیاد بهبود یافته است و این مدل در شبیه‌سازی جریانات گذرا توان بالایی دارد (Yakhot,1992) . . همچنین به استناد مقایسه‌ای که در مطالعات رستمی در سال ۱۳۸۶ بین مـدل‌های آشفتگی با استفاده از نرم افزار Flow-3D انجام داده‌شده است نشان دادند مدل آشفتگی RNG نتایج دقیق‌تری نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی بر روی کانالها و مجاری جریان دارد که از مدل آشفتگی RNG استفاده گردید (صباغ و همکاران ۱۳۸۷).

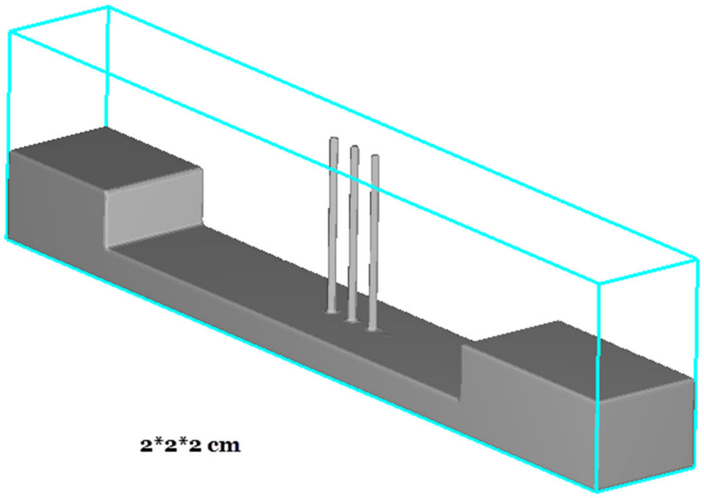
در این شبیه‌سازی جریان در بستر فرسایشی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود، سیال لزج ، تراکم ناپذیر و ورود هـوا با چگالی ۱/۲ kg/m^3 و ضریب تنش برشی آن ۰/۰۷۳ در نظر گرفته شد. تمامی مراحل شبیه‌سازی و صحت سنجی مدل‌ها با توجه به شرایط مشابه آزمایشگاهی انجام شده است. اولین گام در یک مدل عددی انتخاب مدل صحت سنجی شده می‌باشد. بدین معنی که تاثیرات عوامل خارجی را به حداقل رسانده و شرایط مدل را به شرایط واقعی نزدیک‌تر کرد.

یکی از مهم‌ترین مزیت مدل عددی Flow3D نسبت به سایر مدل‌های شبیه‌سازی میدان جریان در تعیین و تخمین بهترین شبکه‌بندی میدان حل بر اساس مدل هندسی مورد مطالعه می‌باشد. به منظور تعیین اندازه شبکه‌های میدان محاسباتی جریان در مدل حاضر شکل ابتداً سلول‌های محاسباتی در راستای طولی و عرضی و ارتفاع (X×Y×Z) به ابعاد ۳ سانتی متر در نظر گرفته شد که در این حالت پس از صحت سنجی ابعاد سلول‌های شبکه بندی توسط بخش FAVOR مدل عددی Flow3D مشخص گردید که ابعاد سلول‌های انتخاب شده برای هندسه کانال و پایه‌های دایره‌ای مناسب نمی‌باشند. به عبارتی دیگر کل هندسه موجود توسط سلول‌های ۳ سانتی متری تحت پوشش قرار نمی‌گیرد و به خصوص پایه‌های با مقاطع دایره‌ای در مدل دیده نمی شوند. با کوچک‌تر نمودن سلول‌های محاسباتی به ۲ سانتی متر نیز مقاطع دایروی پایه قربانی شونده پل‌ها به درستی مدل‌سازی نشدند. پس از بررسی و صحت سنجی ابعاد در این مرحله نیز مشاهده می‌شود که بخشی از سلول‌های مدل هندسی معرفی شده توسط مدل عددی مناسب نمی‌باشد. به همین صورت با تغییر ابعاد سلول-های شبکه بندی در مدل عددی بهینه ترین و مناسب ترین ابعاد سلول‌های شبکه بندی در جهت

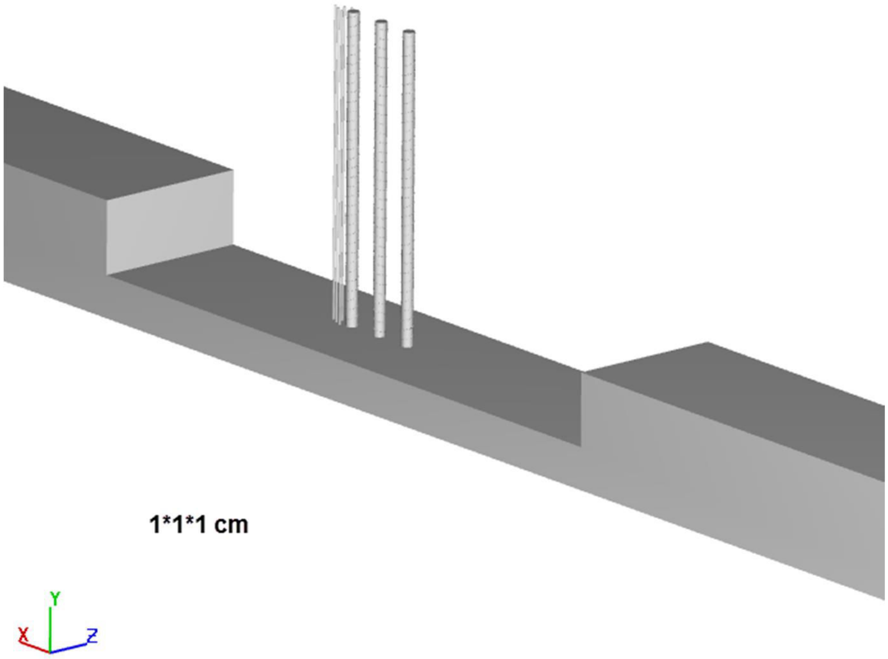
طولی ۱ سانتی متر، در جهت عرضی ۱ سانتی متر و در راستای عمق جریان نیز ۱ سانتی متر در نظر گرفته شد. در مجموع حدود ۸۰۰۰۰۰ شبکه محاسباتی برای مدل فوق در نظر گرفته‌شده است. شرایط مختلف ابعاد سلول‌های محاسباتی در شکل زیر نمایش داده‌شده است.



3*3*3 cm



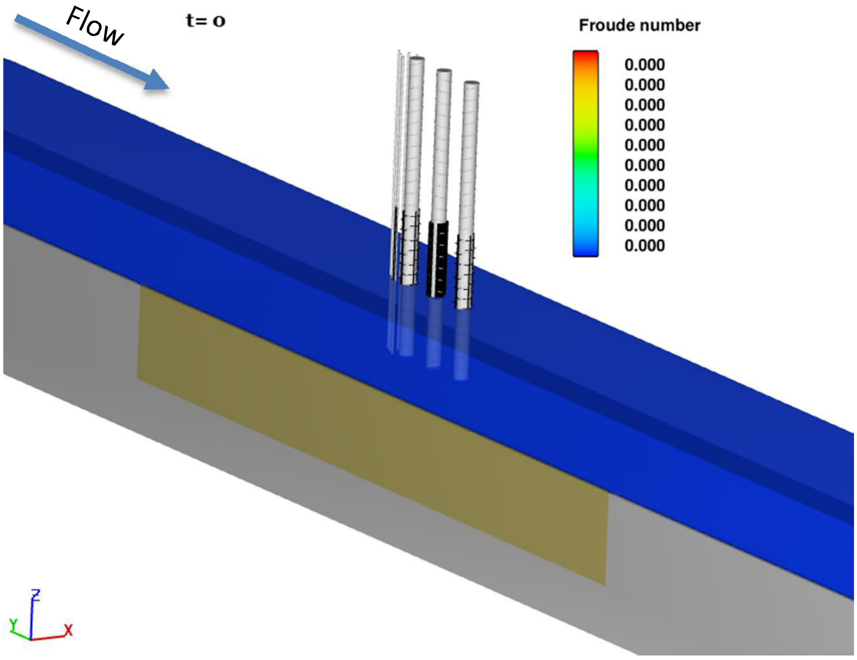
2*2*2 cm

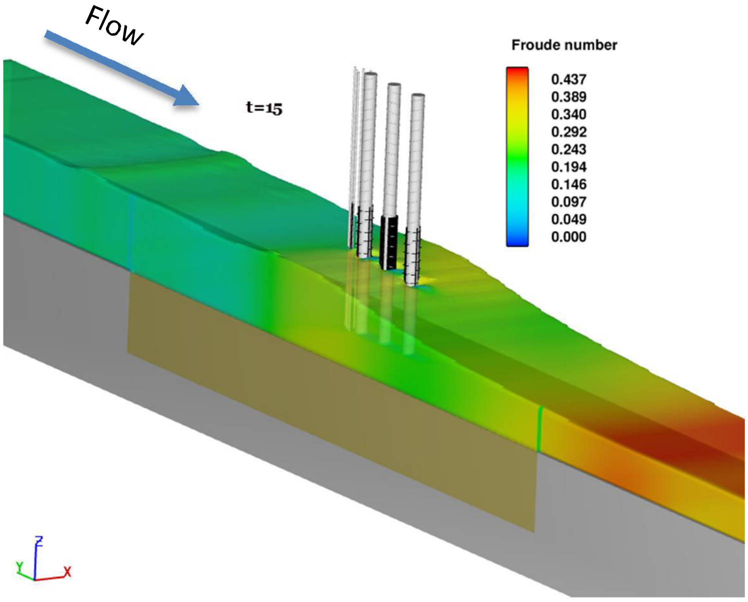


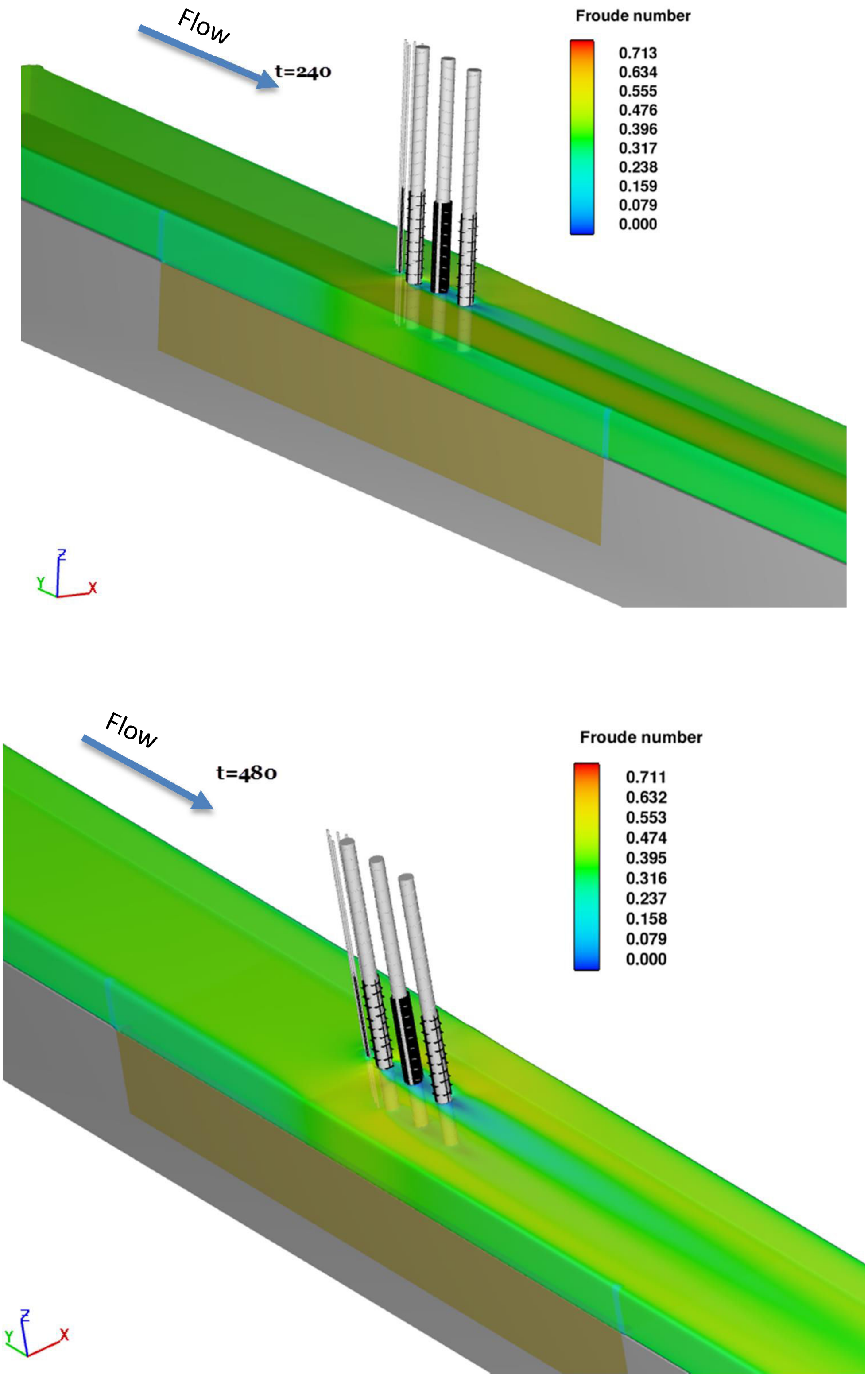
شکل ۴-۴: شبکه بندی های مختلف و انتخاب شبکه بندی صحت سنجی شده برای هندسه مدل

آنچه در اینجا مطرح می‌شود، صحت سنجی کردن مدل عددی از لحاظ شرایط مرزی و شبیه‌سازی می‌باشد. برای استخراج مقادیر صحیح و دقیق داده‌های یک مدل عددی یا آزمایشگاهی، رسیدن به حالت شرایط پایدار ضروری می‌باشد. معیار زمان تعادل دراین آزمایش ها معیاری است که کومار و همکاران (۱۹۹۹) در تحقیقات خود در نظر گرفتند و مطابق این معیار مدت زمانی است که تغییرات عمق آبشستگی در سه ساعت متوالی بیشتر از یک میلیمتر نباشد. از آنجا که نزدیک به ۸۰ درصد عمق آبشستگی در ۸ ساعت اول انجام آزمایش اتفاق افتاده است تمامی آزمایش های این مطالعه منطبق با مدل آزمایشگاهی، در مدت زمان ۸ ساعت انجام شده است. در مدل عددی مورد مطالعه پس از بررسی چند مدل، زمان مناسب برای استخراج نتایج (پایان محاسبات توسط مدل عددی) از مدل معادل ۴۸۰ گام محاسباتی مد نظر قرار گرفت. در شکل زیر نحوه عبور جریان از روی بستر در زمان‌های مختلف قابل مشاهده است. جریان بعد از ۴۸۰ گام محاسباتی، حالت پایداری روی بستر می‌گیرد. در زیر نمودار خروجی از نرم افزار که نشان دهندهٔ رسیدن به حالت جریان دائمی (Steady)

و پایدار می باشد نمایش داده‌شده است. در شکل‌های زیر مراحل مختلف گام زمانی نشان داده‌شده است.

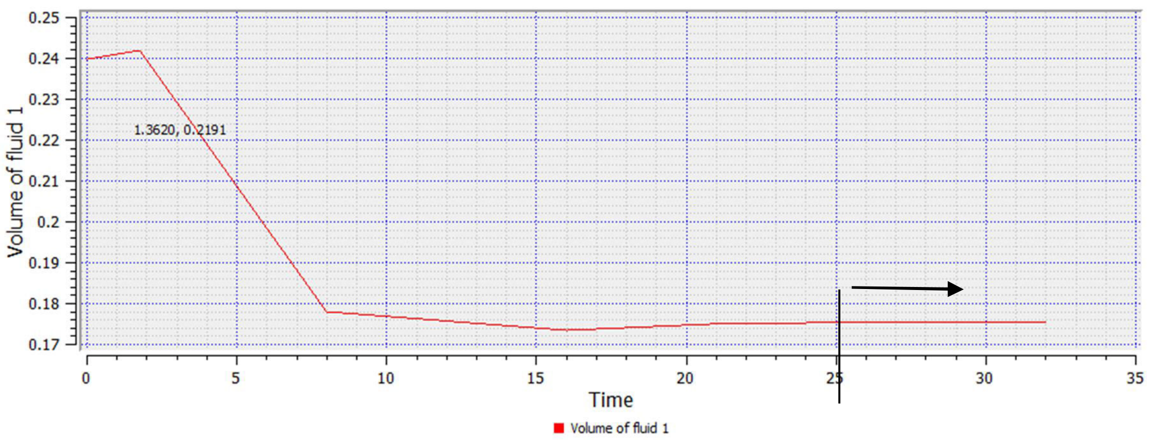






شکل ۴-۵: مراحل مختلف محاسباتی زمانی پایداری جریان در کانال برای محور مرکزی کانال

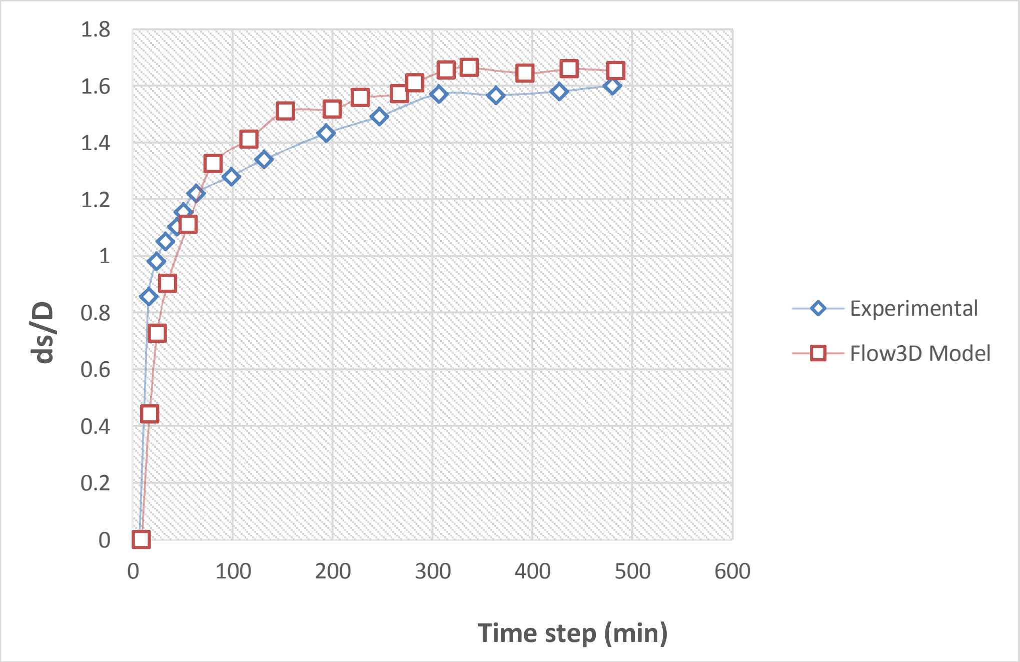
نمودار شکل زیر نتایج حاصل از تغییرات دبی خروجی از مرز انتهای کانال می باشد. همان‌طور که در شکل زیر نشان داده‌شده است پس از تقریباً ۲۵ گام زمانی مجموع دبی خروجی از مرز انتهای کانال تقریباً ثابت است و جریان به حالت پایدار رسیده است.



شکل ۴-۶: پایدار شدن جریان در کانال مدل‌سازی جریان بر اساس مجموع دبی خروجی از مرز انتهای کانال

به منظور تعیین درصد خطای مدل عددی نسبت به نتایج مدل عددی آزمایشگاهی پارامتر توسعه زمانی عمق آبشستگی علاوه بر حالت ساده تک پایه، مدلسازی گروه پایه سه تایی برای پایه ها در مدل عددی و آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته اند که در شکل های زیر نشان داده شده است.

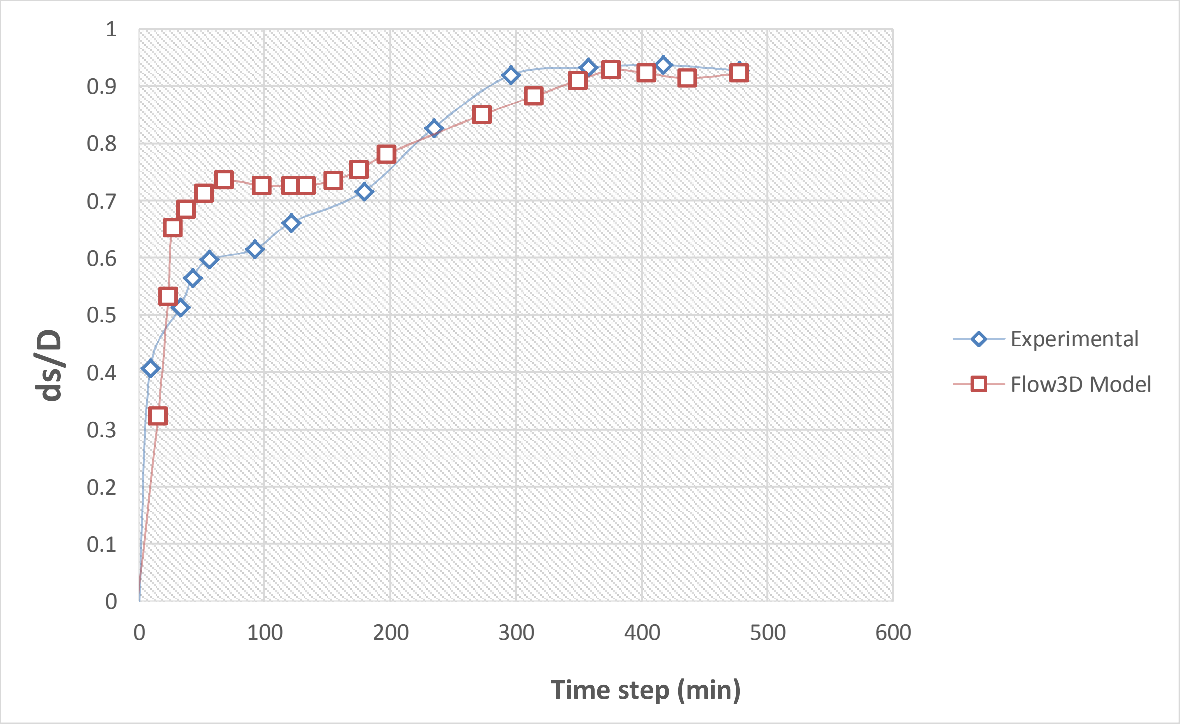
توسعه زمانی عمق آبشستگی در تک پایه بدون کابل و گروه پایه های دارای کابل به همراه قربانی شونده در شکل های زیر در دو حالت مدلسازی عددی و مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است. در این شکل محور عمودی بر حسب نسبت عمق آبشستگی به قطر پایه $(\frac{d_s}{D})$ و محور افقی بر حسب زمان قرائت عمق آبشستگی (t) بیان گردیده است. برای سایر نمودارهای مربوط به بخش توسعه زمانی آبشستگی، پارامترهای محورهای افقی و عمودی به همین صورت تعریف خواهند شد. با توجه به شکل مشاهده می شود که ٪ ۸۰ آبشستگی در ۱۰۰ دقیقه ابتدایی و ٪ ۹۰ آبشستگی بعد از ۲۰۰ دقیقه همچنین زمان تعادل در تک پایه با توجه به شکل حدود ۸ ساعت بوده است. بنابراین حدود ٪ ۹۰ عمق آبشستگی در نیمی از زمان تعادل اتفاق رخ داده است.



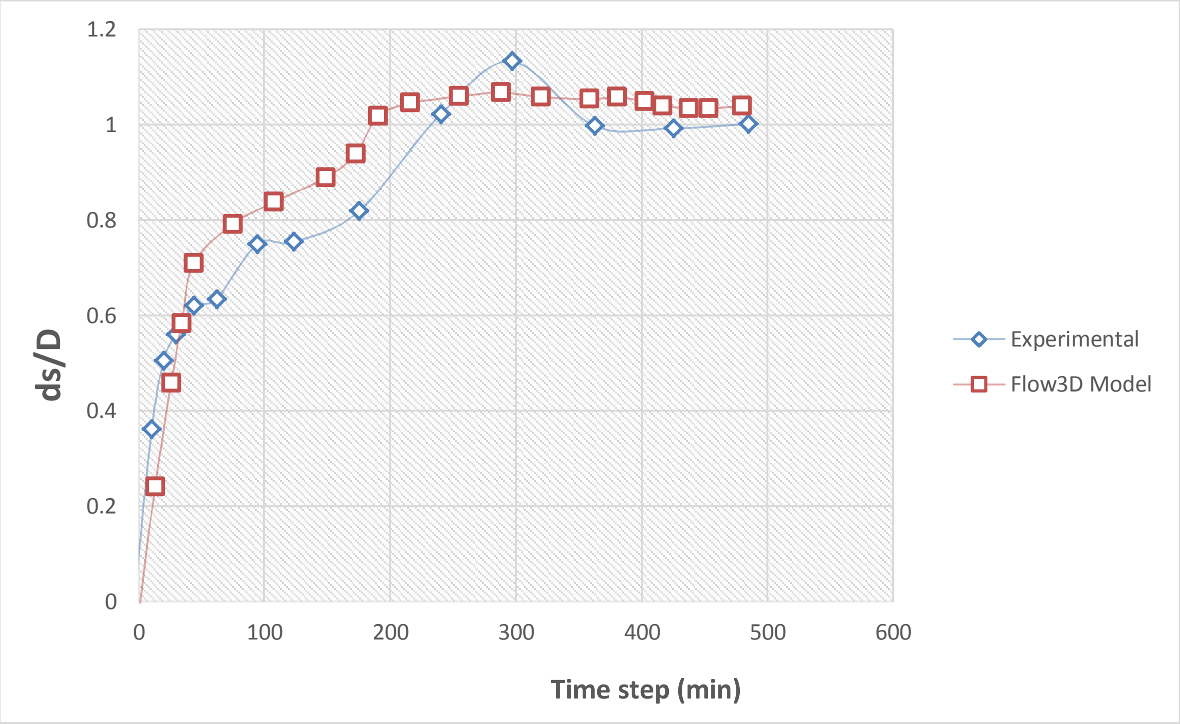
شکل ۴-۷: مقایسه عددی و آزمایشگاهی توسعه زمانی عمق حفره آبشستگی در پایه تکی ساده

همانطور که در نمودار شکل فوق مشاهده می شود روند زمانی آبشستگی و مقادیر عمق نسبی حفره آبشستگی در دو حالت مدلسازی عددی و فیزیکی بسیار نزدیک به هم هستند و دارای اختلاف بسیار ناچیز هستند که درصد خطای مدل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی در ادامه ارائه خواهد.

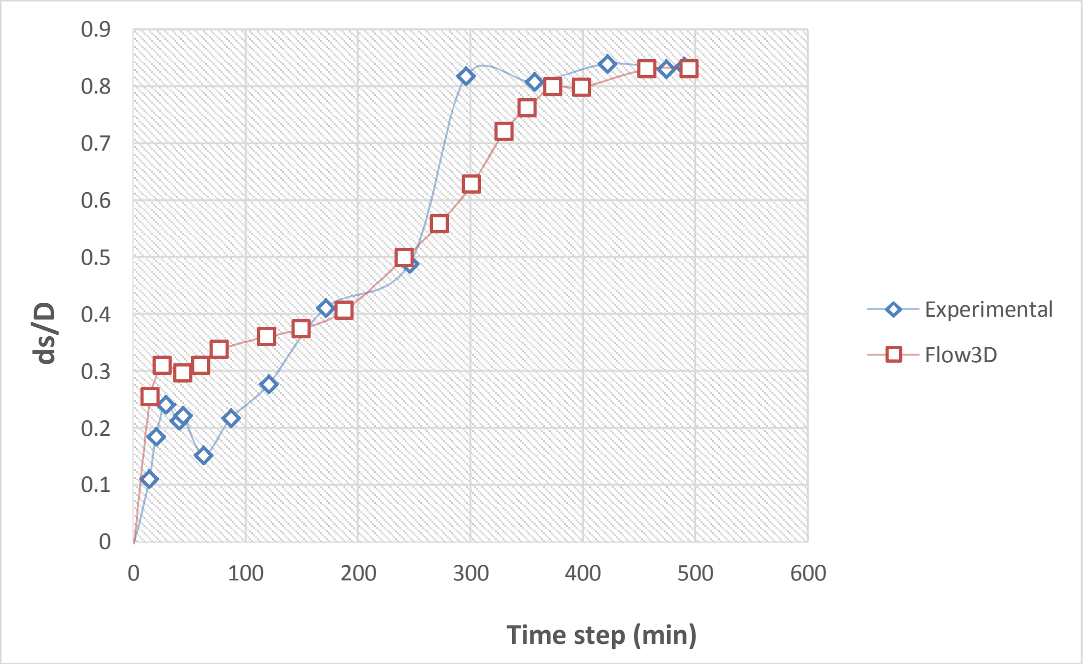
به منظور تعیین درصد خطای مدل عددی نسبت به نتایج مدل آزمایشگاهی پارامتر توسعه زمانی عمق آبشستگی مدلسازی گروه پایه سه تایی برای پایه ها در مدل عددی و آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته اند که در شکل های زیر نشان داده شده است. مطابق اشکال زیر در همان ثانیه های ابتدایی شروع آزمایش و اجرای مدل عددی آبشستگی آغاز می شود و پس از گذشت تنها چند دقیقه در پایه سوم نیز آبشستگی آغاز میگردند. در این حالت نیز وجود کابل و پایه های قربانی شونده، زمان رسیدن به حالت تعادل را افزایش میدهند. همانطور که برای پایه های اول تا سوم مشاهده می شود روند افزایش آبشستگی برای هر سه پایه وجود دارد.



شکل ۴-۸: مقایسه عددی و آزمایشگاهی توسعه زمانی عمق حفره آبشستگی در گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه اول



شکل ۴-۹: مقایسه عددی و آزمایشگاهی توسعه زمانی عمق حفره آبشستگی در گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه دوم



شکل ۴-۱۰: مقایسه عددی و آزمایشگاهی توسعه زمانی عمق حفره آبشستگی در گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه سوم

در گام اول مقایسه دو حالت ساده و گروه پایه ها نشان میدهد که استفاده از کابل و پایه های قربانی شونده روند آبشستگی تا حد زیادی کندتر نماید اما با گذشت زمان به ویژه در پایه اول این پدیده بیشتر شده و عمق آبشستگی آن با پایه اول آزمایش بدون کابل و پایه های قربانی شونده اختلاف بیشتری پیدا کرده است. در گام دوم نیز مقایسه نمودارهای فوق در دو حالت آزمایشگاهی و عددی نشان میدهد که روند افزایش عمق نسبی آبشستگی تقریباً یکسان هستند و بیشترین اختلاف برای پایه سوم می باشد زیر در این ناحیه حداکثر آشفتگی جریان شکل می گیرد. به منظور تعیین درصد خطای مدل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی درجدول زیر میانگین مقادیر آبشستگی نسبی در بازه زمانی ۵۰ دقیقه ای مورد مقایسه قرار گرفته اند.

جدول ۴-۱: درصد خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاه برای حالت تک پایه ساده

	پایه ساده (ds/D)		
Time min	آزمایشگاهی	عددی	Error %
50	1.16	1.11	3.92
100	1.28	1.41	10.17
150	1.34	1.51	12.63
200	1.43	1.52	5.90
250	1.49	1.56	4.32
300	1.57	1.57	0.05
350	1.57	1.66	5.74
400	1.58	1.66	4.94
Average Error %			**5.96**

جدول ۴-۲: درصد خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاه برای گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه اول

	پایه اول (ds/D)		
Time min	آزمایشگاهی	عددی	Error %
50	0.597	0.703	17.725
100	0.615	0.707	14.809
150	0.662	0.735	11.165
200	0.717	0.781	9.030
250	0.828	0.850	2.763
300	0.910	0.910	0.035
350	0.913	0.924	1.137
400	0.957	0.923	3.590
Average Error %			**7.53**

جدول ۴-۳: درصد خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاه برای گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه دوم

	پایه دوم (ds/D)		
Time min	آزمایشگاهی	عددی	Error %
50	0.634	0.709	11.710
100	0.750	0.808	7.725
150	0.764	0.878	14.939
200	0.899	1.018	13.254
250	1.022	1.059	3.615
300	1.133	1.059	6.560
350	0.998	1.058	6.022
400	0.993	1.034	4.190
Average Error %			**8.50**

جدول ۴-۴: درصد خطای مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاه برای گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه سوم

	پایه سوم (ds/D)		
Time min	آزمایشگاهی	عددی	Error %
50	0.26	0.31	17.94
100	0.28	0.32	14.63
150	0.30	0.34	15.85
200	0.41	0.37	8.98
250	0.49	0.50	1.90
300	0.79	0.67	15.66
350	0.81	0.76	5.73
400	0.84	0.80	4.94
Average Error %			**10.70**

همانطور که در جدول های فوق مشاهده می گردد کمترین خطای میانگین مدلسازی عددی برای حالت پایه ساده می باشد که در حدود ۶٪ می باشد و بیشترین خطای میانگین مدلسازی عددی مربوط به گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه سوم در حدود ۱۱ درصد می باشد. علت افزایش خطا مدل عددی در تعیین مقادیر نسبی عمق آبشستگی در گروه پایه سوم می تواند در افزایش آشفتگی جریان در حالت باشد.

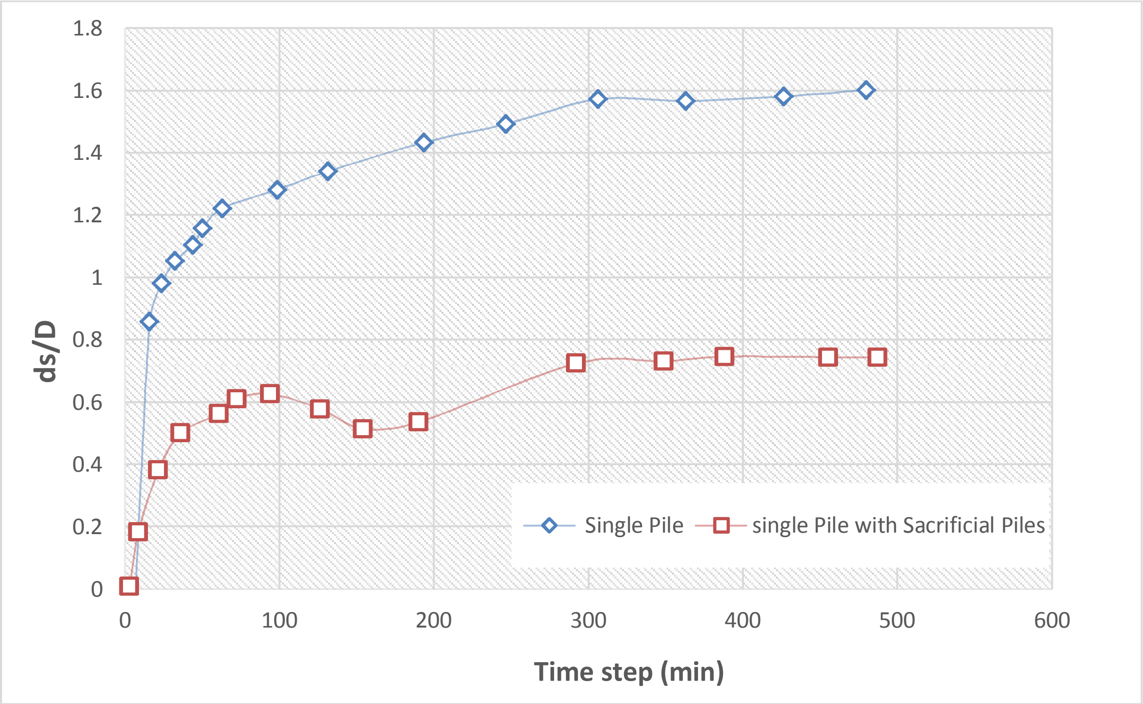
همان‌طور که در بخش های مختلف قبلی نیز بیان شده به منظور یک مدل‌سازی ابتدا بایستی شرط هندسی مدل را ایجاد نمود و با استفاده از اطلاعات دقیق شرایط مرزی و شرایط اولیه برای مدل معرفی نمود و سپس با استفاده از اطلاعات و نتایج قبلی یک مدل را تا حد امکان کالیبره کرد. در این پژوهش نیز با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی موجود که بر روی پایه پل ها با مقطع دایره‌ای انجام یک مدل‌سازی انجام گرفت و مدل با درصد خطای کمتر از ۱۰٪ صحت سنجی شده است. در این بخش صحت سنجی اولیه مدل عددی و شبیه سازی آبشستگی پایه پل و اختلاف نتایج بین عددی و آزمایشگاهی ارائه شده است. در ادامه شرایط مختلف بررسی عددی تاثیر پایه های قربانی شونده بر کنترل آبشستگی موضعی در گروه پایه های استوانه‌ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۴-بررسی و تحلیل نتایج مدل عددی

۴-۴-۱-مدلسازی عددی تک پایه در حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده

در این بخش از مطالعه به صورت خاص به بررسی تاثیر استفاده از پایه های قربانی در تغییرات مقادیر عمق نسبی آبشستگی در حالت تک پایه با کابل پرداخته خواهد شد. در شکل های زیر نمودار توسعه زمانی عمق آبشستگی نسبی برای تک پایه با کابل و پایه های قربانی شونده بر اساس نتایج مدل عددی نشان داده شده است. در این نمودار مقایسه ای بین نتایج مدل عددی برای مقادیر عمق نسبی آبشستگی بین حالت های تک پایه های با استفاده از پایه های قربانی شونده و بدون پایه های قربانی

شونده ارائه شده است. در مدل عددی تک پایه با کابل به همراه پایه های قربانی شونده آنچه که واضح است کاهش قابل توجه عمق آبشستگی به علت وجود کابل و پایه های قربانی شونده میباشد. در اثر وجود پایه های قربانی شونده هسته مرکزی سرعت جریان که در میانه کانال شکل گرفته است شکافته می شود و ضمن کاهش سرعت از شکل گیری گردابه های بزرگ در این ناحیه جلوگیری می شود. در واقع پایه های قربانی شوند سبب کاهش انرژی جریان می شوند و شرایط استهلاک انرژی جریان قبل از برخورد به پایه اصلی را ایجاد می نمایند و مقادیر عمق آبشستگی نسبی در مجاورت پایه کاهش میدهند.



شکل ۴-۱۱: نتایج مدل عددی برای عمق نسبی حفره آبشستگی در پایه منفرد در دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده

به منظور محاسبه درصد اختلاف مقادیر عمق نسبی آبشستگی در حالت تعادل بین دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده از رابطه زیر استفاده می گردد:

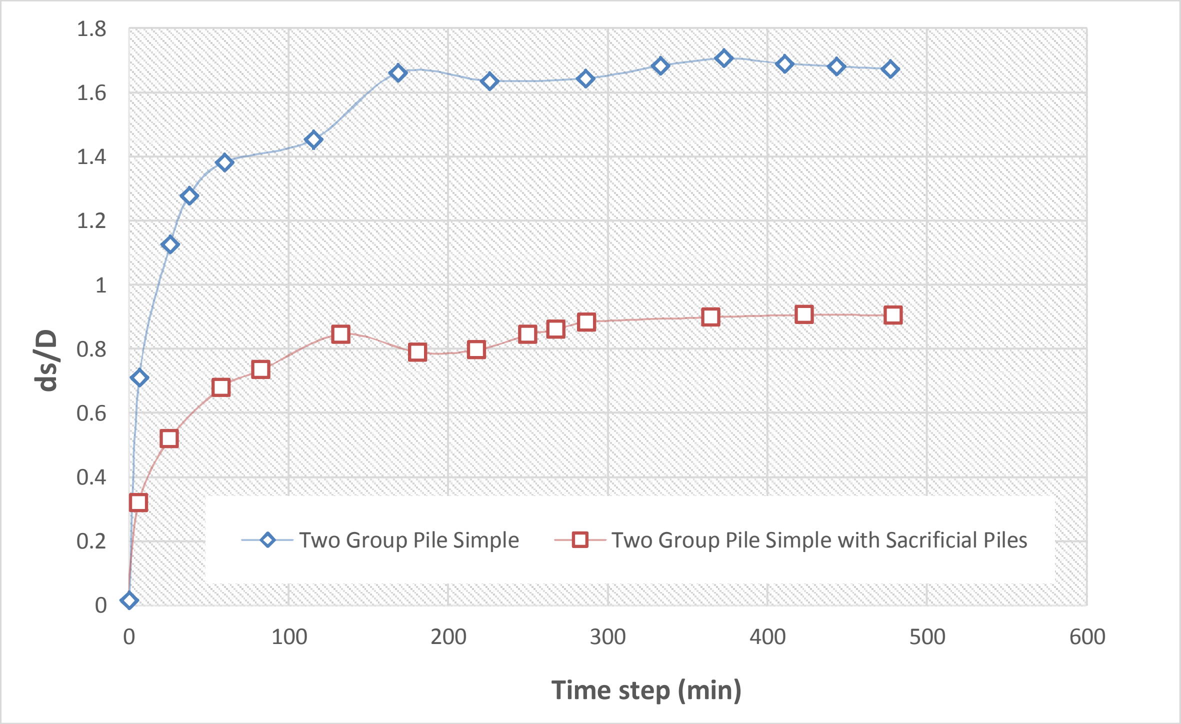
$$\text{درصد اختلاف } \% = 100 * \frac{X_P - X_M}{X_P}$$

(۴-۱)

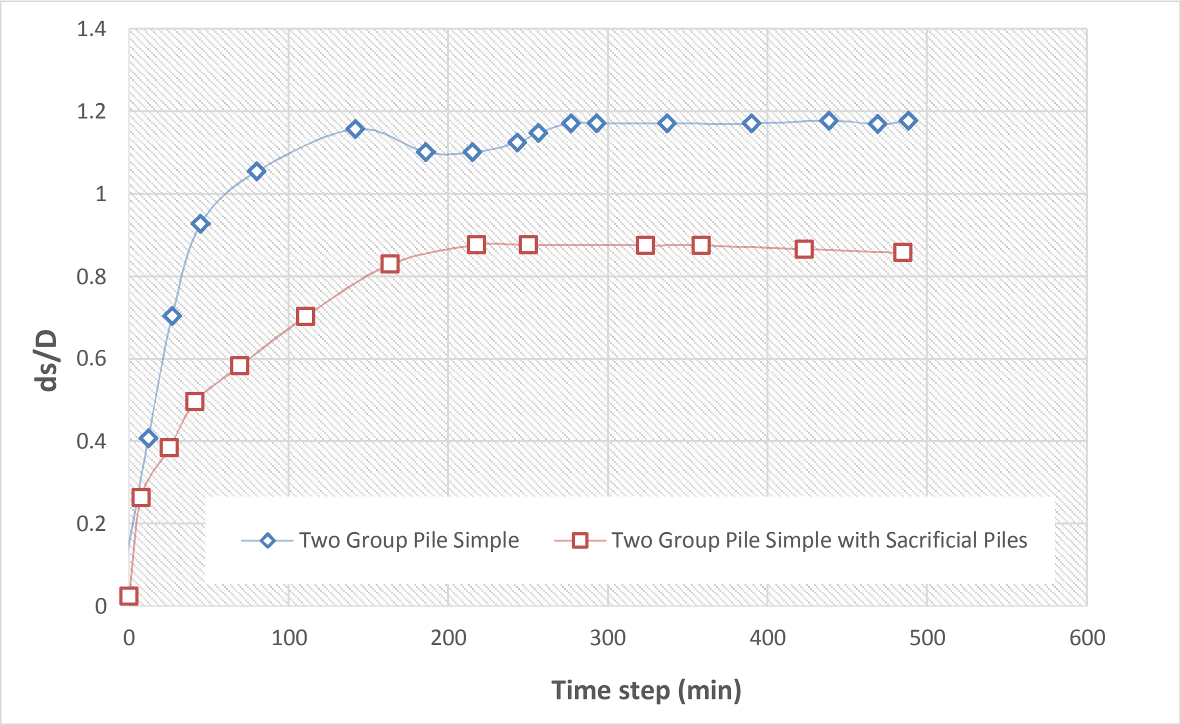
در رابطه فوق X_P مقادیر عمق نسبی آبشستگی در زمان تعادل برای حالت بدون پایه های قربانی شونده و X_M مقادیر مقادیر عمق نسبی آبشستگی در زمان تعادل برای حالت استفاده از پایه های قربانی شونده می باشد. بر این اساس نتایج شبیه سازی عددی نشان میدهد که بکار گیری از پایه های قربانی شونده برای پایه های تکی می تواند تا حدود ۵۴٪ مقادیر عمق نسبی آبشستگی را کاهش دهد.

۴-۴-۲-مدلسازی عددی دو پایه در حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده

در این بخش از مطالعه به صورت خاص به بررسی تاثیر استفاده از پایه های قربانی در تغییرات مقادیر عمق نسبی آبشستگی در حالت گروه پایه دوتایی با کابل پرداخته خواهد شد. در شکل های زیر نمودار توسعه زمانی عمق آبشستگی نسبی برای گروه پایه دوتایی با کابل و پایه های قربانی شونده بر اساس نتایج مدل عددی نشان داده شده است. در این نمودار مقایسه ای بین نتایج مدل عددی برای مقادیر عمق نسبی آبشستگی بین حالت های گروه پایه دوتایی با استفاده از پایه های قربانی شونده و بدون پایه های قربانی شونده ارائه شده است.



شکل ۴-۱۲: نتایج مدل عددی برای عمق نسبی حفره آبشستگی در گروه پایه دو تایی در دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه اول)

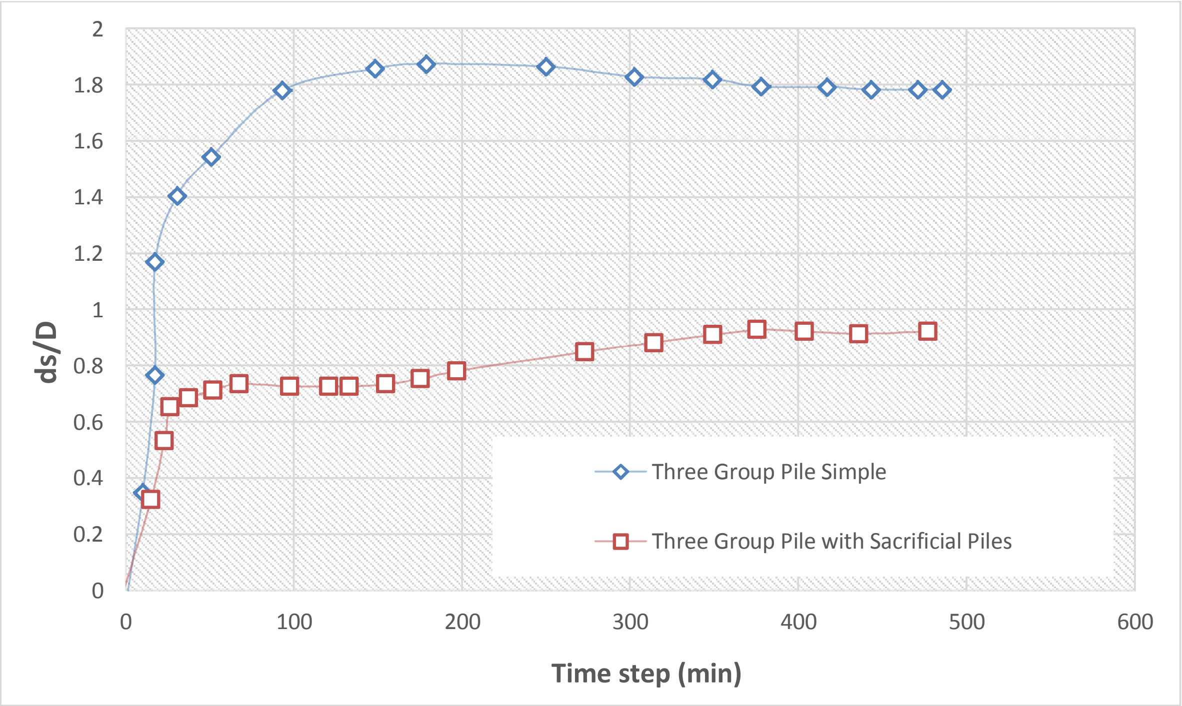


شکل ۴-۱۳: نتایج مدل عددی برای عمق نسبی حفره آبشستگی در گروه پایه دو تایی در دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه دوم)

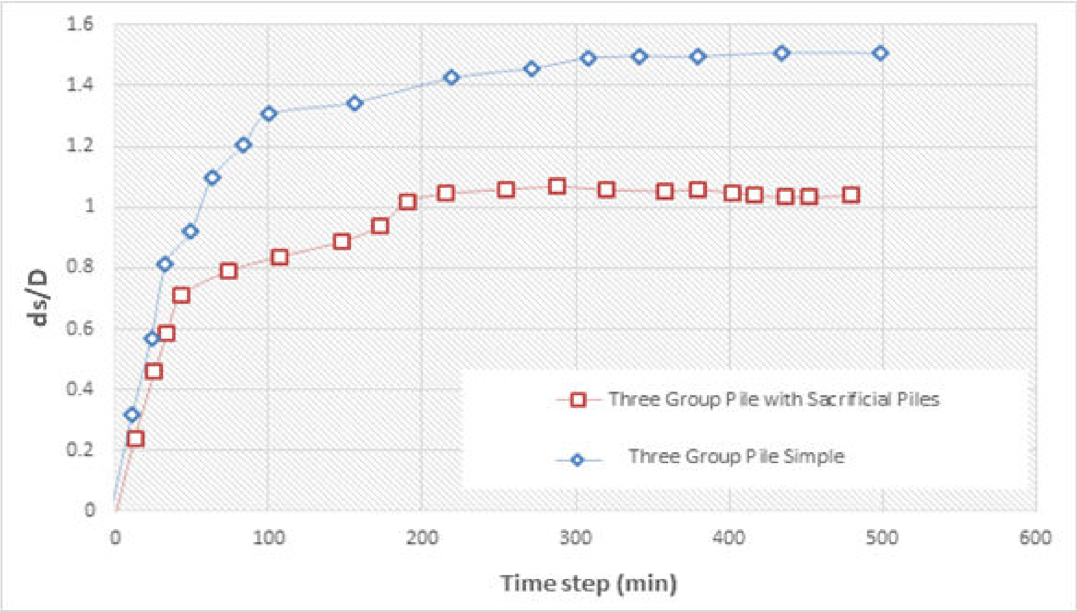
همانطور که در نمودارهای فوق مشاهده می شود استفاده از پایه های قربانی شونده در گروه پایه دوتایی نیز سبب کاهش عمق نسبی حفره آبشستگی می گردد. به طوری که برای پایه اول ۴۶ درصد عمق نسبی حفره آبشستگی با استفاده از پایه های قربانی شونده کاهش می یابد. همچنین نتایج مدل عددی نشان میدهد که مقادیر عمق نسبی حفره آبشستگی برای پایه دوم نیز در اثر استفاده از پایه های قربانی شونده در حدود ۲۷٪ کاهش یافته است. علت اختلاف تاثیر پایه های قربانی شونده بر پایه اول و پایه دوم را می توان شکل گیری مجدد جریان توسعه یافته در پایین دست پایه اول توجیه نمود. به عبارت دیگر در اثر وجود پایه های قربانی شونده شکاف هسته جریان و شکل گیری جریان های چرخشی در بالادست و دورتر از پایه اول سبب کاهش ۵۰٪ درصد مقادیر عمق نسبی آبشستگی می گردد ولی به سبب فاصله موجود بین پایه اول و دوم مجدداً در پایین دست پایه اول هسته مرکزی جریان متمرکز و در اثر برخورد به پایه دوم جریان گردابی در مجاورت پایه دوم تشکیل می گردد و شرایط آبشستگی بستر فراهم می گردد. تعیین فاصله مناسب بین پایه های اول و دوم و همچنین محدود تاثیر پایه های قربانی شوند در ناحیه پایین دست می تواند به عنوان یک موضوع تحقیقاتی مناسب در مطالعات آتی مدنظر قرار گیرد.

۴-۴-۳-مدلسازی عددی سه پایه در حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده

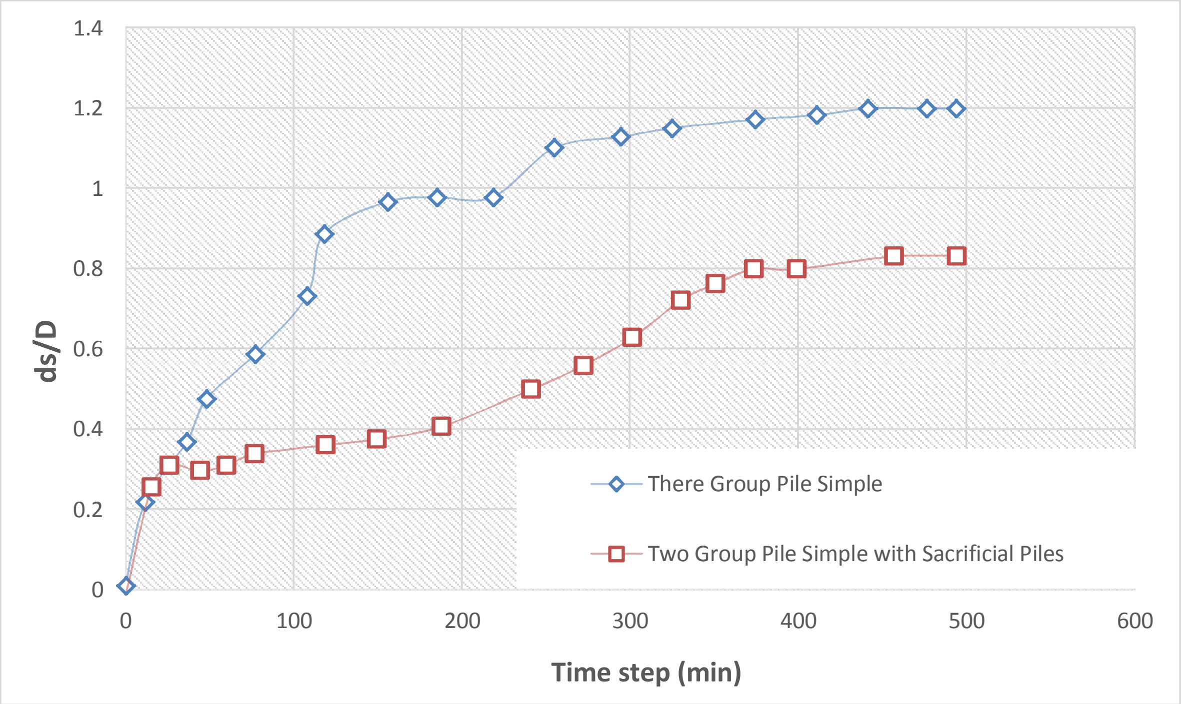
در این بخش از مطالعه به صورت خاص به بررسی تاثیر استفاده از پایه های قربانی در تغییرات مقادیر عمق نسبی آبشستگی در حالت گروه پایه سه تایی با کابل پرداخته خواهد شد. در شکل های زیر نمودار توسعه زمانی عمق آبشستگی نسبی برای گروه پایه سه تایی با کابل و پایه های قربانی شونده بر اساس نتایج مدل عددی نشان داده شده است. در این نمودار مقایسه ای بین نتایج مدل عددی برای مقادیر عمق نسبی آبشستگی بین حالت های گروه پایه سه تایی با استفاده از پایه های قربانی شونده و بدون پایه های قربانی شونده انجام شده است.



شکل ۴-۱۴: نتایج مدل عددی برای عمق نسبی حفره آبشستگی در گروه پایه سه تایی در دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه اول)



شکل ۴-۱۵: نتایج مدل عددی برای عمق نسبی حفره آبشستگی در گروه پایه سه تایی در دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه دوم)

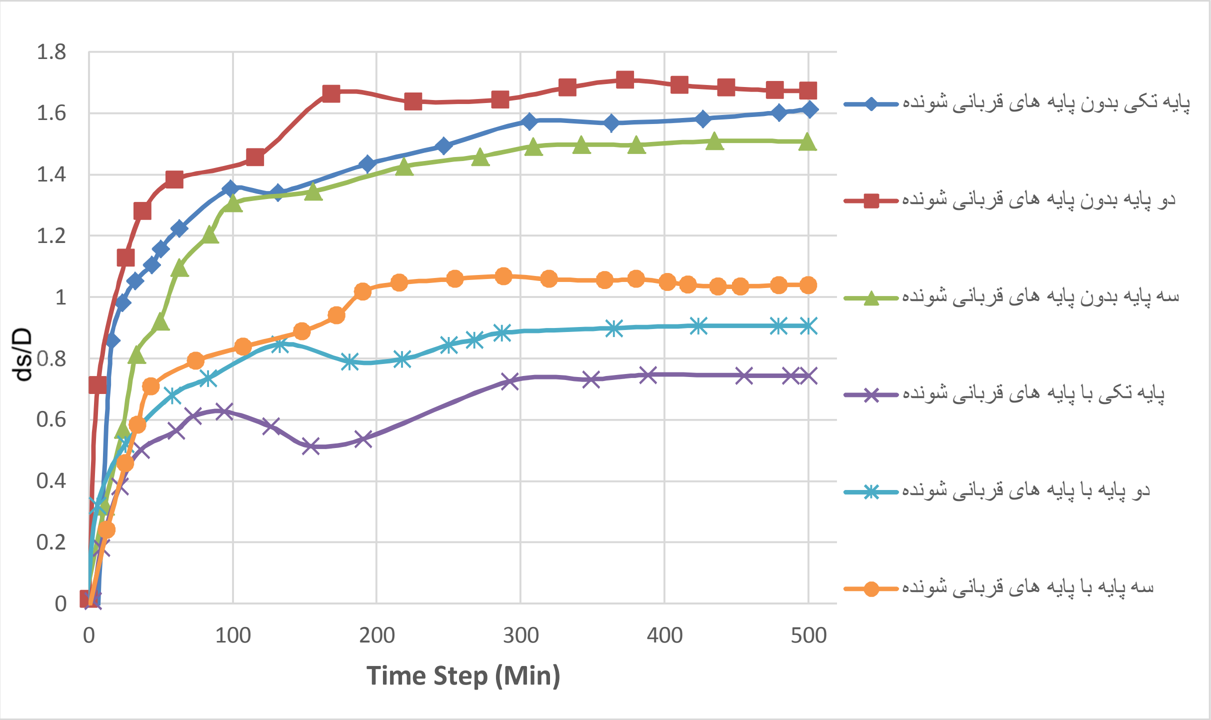


شکل ۴-۱۶: نتایج مدل عددی برای عمق نسبی حفره آبشستگی در گروه پایه سه تایی در دو حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه سوم)

مطابق نتایج مدلسازی عددی همانطور که در نمودار شکل فوق مشاهده می گردد بکارگیری پایه های قربانی شونده در شرایط گروه پایه های سه تایی نیز تا حد مطلوبی عمق نسبی آبشستگی در مجاورت پایه پل ها را کاهش میدهد. بر اساس نتایج مدلسازی عددی تاثیر استفاده از پایه های قربانی شونده در گروه پایه سه تایی برای اولین پایه بسیار زیاد است به طوری که سبب کاهش کاهش حدود ۴۸٪ عمق آبشستگی در این ناحیه می گردد. همچنین تاثیر پایه های قربانی شونده بر کاهش عمق نسبی آبشستگی پایه های شماره ۲ و ۳ نیز به ترتیب در حدود ۲۸ درصد و ۳۱ درصد می باشد. یکی از عواملی که می تواند در کاهش تاثیر وجود پایه های قربانی شونده بر روی مقادیر آبشستگی پایه های ۲ و ۳ گردد وجود پایه شماره ۱ در برابر جریان است که می تواند خود به عنوان یک پایه قربانی شونده بزرگتر عمل نماید و از تاثیر پایه های قربانی شونده اصلی بکاهد.

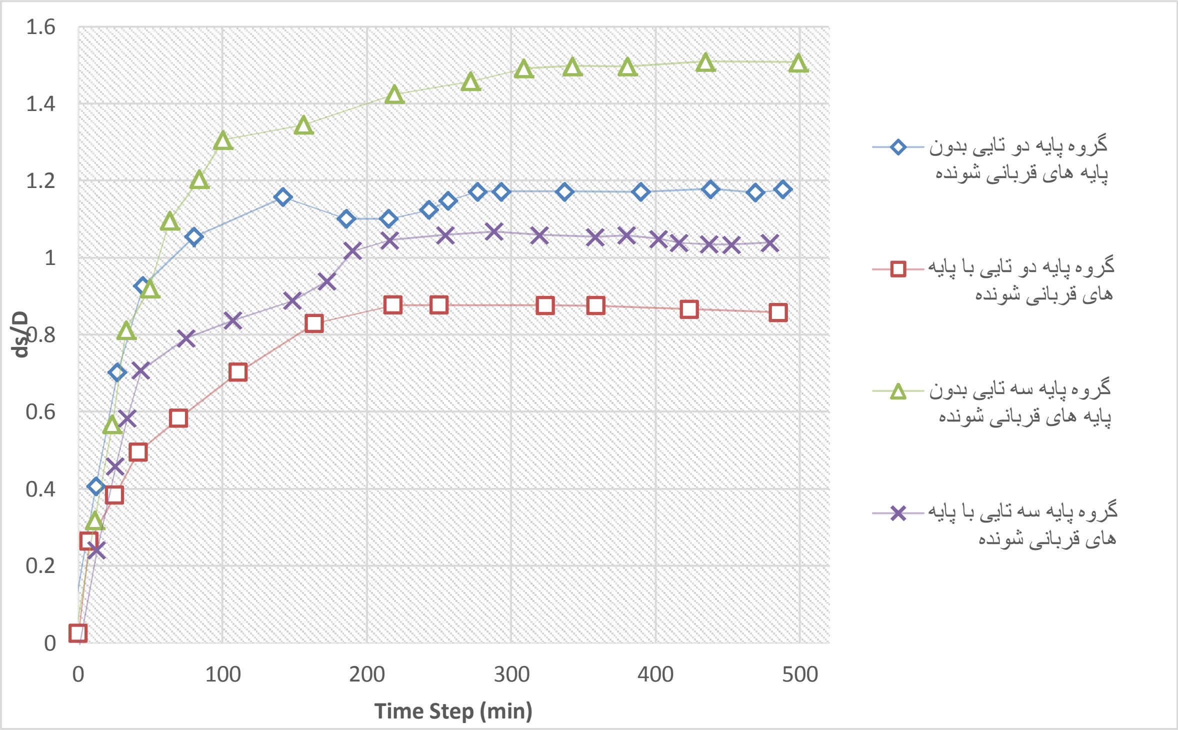
در این بخش از مطالعه، به بررسی و مقایسه شرایط مختلف پایه های منفرد، دو تایی و سه تایی در حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته است. مطابق

نتایج مدل عددی در حالت بدون استفاده از پایه های قربانی شونده برای پایه تکی، پایه دو تایی و پایه های سه تایی با یک اختلاف در حدود ۱۲ درصدی روند مقادیر نسبی آبشستگی حداکثر در بستر تقریباً روند یکسانی را دارد. لازم به ذکر است در این نمودارها مقادیر عمق نسبی آبشستگی ، در محدود پایه اول در کلیه شرایط حداکثر می باشد. بکارگیری پایه های قربانی شونده برای پایه های منفرد، گروه پایه های دو تایی و سه تایی مقادیر نسبی آبشستگی حداکثر را در کلیه شرایط کاهش میدهد. بیشترین تاثیر استفاده از پایه های قربانی شونده برای پایه های منفرد می باشد زیرا در حالت پایه های منفرد در محدوده آن نسبت به حالت های دو پایه و سه پایه آشفتگی جریان کمتر خواهد بود و تاثیر پایه های قربانی شونده در کاهش آبشستگی کمتر است. به عبارت دیگر در حالت سه پایه ، آشفتگی جریان انرژی لازم جهت آبشستگی را دارا می باشد و استفاده از پایه های قربانی شونده تاثیر کمتری خواهند داشت.



شکل ۴-۱۷: مقایسه شرایط مختلف پایه ها تکی، دو پایه ای و سه پایه ای در حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه اول)

به منظور بررسی تاثیر پایه های قربانی شونده بر کاهش مقادیر آبشستگی در محدوده پایه دوم در این بخش مطالعه نمودار تغییرات آبشستگی نسبی برای گروه پایه های دو تایی و سه تایی برای دو حالت با و بدون پایه های قربانی شونده رسم شده است. بر اساس نمودار شکل زیر مشاهده می شود که وجود پایه های قربانی شونده در حالت گروه پایه ها برای پایه دوم نیز در کاهش عمق آبشستگی حداکثر موثر است. نتایج مدل عددی نشان می دهد استفاده از پایه های قربانی شونده در گروه پایه سه تایی نسبت به گروه پایه دو تایی بسیار موثر است و عمق نسبی آبشستگی حداکثر را برای پایه دوم در حدود ۲۸ درصد کاهش میدهد.



شکل ۴-۱۸: مقایسه شرایط مختلف گروه پایه های دو و سه تایی در حالت با و بدون استفاده از پایه های قربانی شونده (پایه دوم)

۴-۵-جمع بندی

همانطور که در بخش های مختلف فصل حاضر نیز ارائه شده مدل عددی Flow3D توانایی بسیار بالایی در شبیه سازی جریان و آبشستگی بسترهای فرسایش پذیر را دارا می باشد. در فصل حاضر سعی گردید با ارائه گام های مختلف شبیه سازی میدان جریان در شرایط مختلف در مدل عددی

Flow3D نتایج مدل عددی در مقایسه با نتایج مدل آزمایشگاهی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گیرد. بر اساس نتایج فصل حاضر حداکثر میانگین خطای شبیه سازی در حدود ۱۰٪ خواهد بود که با توجه به مطالعات قبلی و سایر مدل های موجود این میزان از خطا قابل قبول می باشد و صحت سنجی و کالیبره بودن مدل عددی این مطالعه را تایید می نماید. نتایج توسعه مدل عددی حاضر برای سایر شرایط استفاده از پایه های قربانی شونده نیز نشان داد در کلیه شرایط استفاده از پایه های قربانی شونده سبب کاهش مقادیر عمق نسبی آبشستگی در حدود ۵۰ درصد برای پایه های منفرد می گردد. همچنین برای پایه های گروهی نیز سبب کاهش عمق آبشستگی در کلیه پایه های پل می گردد که برای پایه های پشتی تاثیر کمتری خواهد داشت.

فصل پنجم

نتیجه گیری و

پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

به طور کلی طراحی، محاسبه و احداث پایه‌های پل، از مهمترین و حساس‌ترین مراحل یک پروژه پل‌سازی می‌باشند. بخصوص وقتی که این پل در محل عبور یک رودخانه واقع شده باشد. در این زمان، طراح باید برای انتخاب طول و تعداد دهانه‌ها و عمق حداقل پی پایه‌ها، اطلاعات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی منطقه را در نظر گرفته، مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد. از مهمترین مواردی که در این رابطه می‌توان به آن اشاره نمود، اطلاعات مربوط به فرسایش بستر رودخانه می‌باشد که در صورت در نظر نگرفتن آن، بایستی شاهد عواقب خطرناکی از جمله تهدید پایداری پل و نهایتاً خرابی آن بود. لذا به جهت یک طراحی مناسب و ایمن، به خصوص در رابطه با رودخانه‌های سیلابی با بستر قابل فرسایش، استفاده از روش‌های کاربردی برای تعیین عمق آبشستگی و در نتیجه تعیین وضعیت بهینه از جهت نوع و محل قرارگیری پایه‌ها و استفاده از تدابیری جهت کاهش عمق آبشستگی توصیه می‌گردد. به همین لحاظ پژوهش حاضر با استفاده از یک مدل عددی به بررسی وضعیت پایه های قربانی شونده در پایه‌های پل ها در صورت استفاده منفرد و یا گروهی در جهت جریان نموده است. به طور کلی نتایج حاصل از این پژوهش به‌صورت زیر ارائه می‌گردد.

۵-۲-نتیجه گیری

- با توجه به نتایج مدل عددی برای اغلب شرایط شبیه سازی که ٪ ۸۰ آبشستگی در ۱۰۰ دقیقه ابتدایی و ٪ ۹۰ آبشستگی بعد از ۲۰۰ دقیقه همچنین زمان تعادل در تک پایه حدود

۸ ساعت بوده است. بنابراین حدود ٪ ۹۰ عمق آبشستگی در نیمی از زمان تعادل رخ داده است.

- کمترین خطای میانگین مدلسازی عددی برای حالت پایه ساده می باشد که در حدود ۶٪ می باشد و بیشترین خطای میانگین مدلسازی عددی مربوط به گروه پایه های سه تایی با کابل و همراه پایه های قربانی شونده برای پایه سوم در حدود ۱۱ درصد می باشد. علت افزایش خطا مدل عددی در تعیین مقادیر نسبی عمق آبشستگی در گروه پایه سوم می تواند در افزایش آشفتگی جریان در این حالت باشد.
- بر این اساس نتایج شبیه سازی عددی نشان میدهد که بکار گیری پایه های قربانی شونده برای پایه های تکی می تواند تا حدود ۵۴٪ مقادیر عمق نسبی آبشستگی را کاهش دهد.
- استفاده از پایه های قربانی شونده در گروه پایه دوتایی نیز سبب کاهش عمق نسبی حفره آبشستگی می گردد. به طوری که برای پایه اول ۴۶ درصد عمق نسبی حفره آبشستگی با استفاده از پایه های قربانی شونده کاهش می یابد.
- نتایج مدل عددی نشان میدهد که مقادیر عمق نسبی حفره آبشستگی برای پایه دوم برای گروه پایه دو تایی در اثر استفاده از پایه های قربانی شونده در حدود ۲۷٪ کاهش یافته است.
- بر اساس نتایج مدلسازی عددی تاثیر استفاده از پایه های قربانی شونده در گروه پایه سه تایی برای اولین پایه بسیار زیاد است به طوری که سبب کاهش حدود ۴۸٪ عمق آبشستگی در این ناحیه می گردد.
- تاثیر پایه های قربانی شونده بر کاهش عمق نسبی آبشستگی پایه های شماره ۲ و ۳ در گروه پایه های سه تایی نیز به ترتیب در حدود ۲۸ درصد و ۳۱ درصد می باشد. یکی از عواملی که

می تواند در کاهش تاثیر وجود پایه های قربانی شونده بر روی مقادیر آبشستگی پایه های ۲ و ۳ گردد وجود پایه شماره ۱ در برابر جریان است که می تواند خود به عنوان یک پایه قربانی شونده بزرگتر عمل نماید و از تاثیر پایه های قربانی شونده اصلی بکاهد.

۵-۳- پیشنهادات

- نتایج مدل‌سازی اثرآبشستگی پایه پل‌ها با مقاطع دایروی و پایه های قربانی شونده با استفاده از مدل Flow3D با سایر مدل‌های عددی مانند مدل‌های Fluent و یا مدل Ansys CFX مورد مقایسه و تحلیل قرار گیرد.

- مدل‌سازی اثر آبشستگی پایه پل‌ها در اثر استفاده از پایه های قربانی شونده با سایر مقاطع همانند مقاطع بیضوی و مستطیلی می‌تواند مورد مقایسه قرار گیرد.

- با تغییر در مصالح بستر می‌توان مقادیر آبشستگی در مجاورت پایه پل ها را بیشتر مورد بررسی قرار داد. به عنوان مثال می‌توان از مصالح غیر یکنواخت برای چنین مدلسازی‌هایی استفاده شود.

- تاثیر فاصله قرارگیری پایه های قربانی شونده در مقادیر آبشستگی در پایه پل ها

فهرست منابع

1 Kayaturk SY, (2005), PhD.thesis,"Scour and scour protection at bridge abutment", Middle East Technical University, Ankara, Turkey.

۲ شفاعی بجستان،م. مرادلو، ج. تفرج نوروز، ع. اتحاد، ع،(۱۳۸۴)، بررسی فرسایش پایین دست حوضچه آرامش سد میل و مغان، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، کرمان، دانشگاه باهنر کرمان.

۳ مقیمان، م. نبوتی، آ، (۱۳۸۲)، شبیه سازی عددی جریان سه بعدی آشفته هوا در اتاقهای عمل، هشتمین کنفرانس دینامیک شاره ها، تبریز، دانشگاه تبریز، انجمن فیزیک ایران.

4 Melville, Bruce W., and Arved J. Raudkivi, (1977). "Flow characteristics in local scour at bridge piers." Journal of Hydraulic Research 15.4, 373-380.

۵ راهنمای تعین آبشستگی در اطراف سازه‌های مهم هیدرولیکی. نشریه شماره ۳۱۶-ن.

6 Vittal, N., Kothyari, U. C., and Haghighat, M. (1994). Clear water scour around bridge pier group. Journal of Hydraulic Engineering, 120(11): 1309-1318.

۷ راهنمای روش های محاسبه آبشستگی موضعی. نشریه شماره ۳۱۸-الف.

۸ شفاعی بجستان، م. (۱۳۷۸). هیدرولیک رسوب. ویرایش دوم، انتشارات شهید چمران اهواز

9 Dey, S., Sumer, B. M., and Fredsoe, J. (2006). Control of scour at vertical circular piles under waves and current. Journal of Hydraulic Engineering, 132(3): 270-279

10 Abd El-Razek, M. Abd El-Motaleb, M. and Bayoumy, M. (2003). Scour reduction around bridge piers using internal openings through the pier, Proc., XXX Iahr Congress, Thessaloniki, Greece, C2,: 285-292.

۱۱ ارونقی، ه. حسین زاده دلبر، ع. فرسادی زاده، د. فاخری فرد، ا. اقبالی، پ. (۱۳۹۲)." بررسی تاثیر ضخامت طوق اطراف پایه پل در کاهش آبشستگی". مجله پژوهشی حفاظت آب و خاک، جلد۲۰، شماره۲.

۱۲ اردشیر، ع. چراغی، ر. کرمی، ح. (۱۳۹۱). "بررسی آزمایشگاهی تاثیر طوق در کاهش عمق آبشستگی اطراف تکیه گاه های مستطیلی و دیوار باله ای". نشریه مهندسی عمران، سال ۲۴، شماره۱.

۱۳ خزیمه نژاد، ح. قمشی، م. خادمی، خ. (۱۳۹۱). "بررسی و مقایسه عملکرد طوقه های متقارن و نامتقارن در کاهش آبشستگی موضعی پیرامون تکیه گاه پل". نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، دانشگاه شهید چمران.

۱۴ صمیمی بهبهان، تورج. بارانی، غ. رحیم خانلی، م. خانجانی، م. (۱۳۸۵). "بررسی آبشستگی اثر صفحات مستغرق بر آبشستگی پایه پل ها". همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی.

15 Dargahi, B. (1990). "Controlling mechanism of local scouring. Journal of Hydraulic Engineering", 116(10): 1197-1214.

16 Mashahir, M. B., Zarrati, A. R., and Rezayi, M. J. (2004)."Time development of scouring around a bridge pier protected by collar". Proc Second Int. Conf. on scouring and Erosion, Nanyang, Singapore.

17 Zarrati, A. R., Gholami, H., and Mashahir, M. B. (2004). "Application of collar to control scouring around rectangular bridge piers". Journal of Hydraulic Research, 42(1): 97-103.

18 Vittal, N., Kothyari, U. C., and Haghighat, M. (1994). "Clear water scour around bridge pier group". Journal of Hydraulic Engineering, 120(11): 1309-1318.

19 Heidarpour, M., Khodarahmi, Z., and Mousavi, S. F. (2003). “Control and reduction of local scour at bridg pier groups using slot”. Proc., XXX LAHR Congress, Thessaloniki, Greece, August 24-29: 301-307.

20 Chiew, Y. (1992). “Scour protection at bridge piers”. Journal of Hydraulic Engineering, 118(9): 1260-1269.

۲۱ بصیرت، ش. صانعی، م. ساغروانی، ف. (۱۳۸۸). “کاهش میزان آبشستگی تکیه‌گاه پل با استفاده از آبشکن محافظ”. هشتمین کنگره بین-المللی مهندسی عمران، شیراز.

22 Chabert, J., and Engeldinger, P. (1956). “Etude des afouillements autour des piles des ponts”. Report, Laboretoire National Hydraulique, Chatou, France.

۲۳ پیرایش، ع. صانعی، م. (۱۳۹۰).” تاثیر فاصله گروه شمع از تکیه‌گاه پل درکاهش آبشستگی موضعی”. دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه گیلان.

24 Inglis, Claude Cavendish. “The behaviour and control of rivers and canals (with the aid of models)”. No. 13. Yeravda Prison Press, 1949.

25 Laursen, E.M. and Toch, A., (1956), "Scour around bridge piers and abutments" Bulletin No. 4, Iowa Highway Research Board, Ames, Iowa.

26 Li, H., Kuhnle, R.A. and Barkdoll, B.D. (2006). “Countermeasures against Scour at Abutments”. Report No. 49, USDA Agricultural Research Service.

27 Shen, Hsieh Wen, V. R. Schneider, and Susumu Karaki. (1969). "Local scour around bridge piers." *Journal of the Hydraulics Division*.

28 Richardson, Everett V., et al. (1975) “Highways in the river environment”. Hydraulic and environmental design considerations .Training and design manual. No. Fhwa-nhi-76-N005.

29 Richardson, E. V., Harrison, L. J., Richardson, J. R., & Davis, S. R. (1993). Evaluating scour at bridges (No. HEC 18 (2nd edition)).

30 Liriano, S., and R. Day. (2001) "Prediction of scour depth at culvert outlets using neural networks." Journal of hydroinformatics 3: 231-238.

31 Tomer, M. D., et al. (2007)"Spatial patterns of sediment and phosphorus in a riparian buffer in western Iowa." Journal of soil and water conservation 62.5, 329-338.

۳۲ شریعت رضوی، مهری؛ بابک لشکرآرا و منوچهر فتحی مقدم، (۱۳۹۲)، "بررسی تاثیر اندازه ذرات رسوب بر عمق آبشستگی موضعی پایه پل دربستر متحرک"، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و توسعه پایدار شهری، تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز

[33] Melville, Bruce W., and Anna C. Hadfield. (1999). "Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures." Journal of Hydraulic Engineering 125, no. 11. 1221-1224.

[34] Kayatürk, S. Y.; Gögüs, M.(2006) ,”Application of Sacrificial Piles to Control Scouring Around Bridge Piers”, Third International Conference on Scour and Erosion, ICSE 3. 01.-03.Netherlands.

[35] Park, Jae Hyeon, Chamroeun Sok, Chang Kun Park, and Young Do Kim. (2016) "A study on the effects of debris accumulation at sacrificial piles on bridge pier Scour: I. Experimental Results." KSCE Journal of Civil Engineering 20, no. 4: 1546-1551.

[36] Flow-3D Help, Ver9.3, Flow science Inc.

[37] Streeter V. L., (1998) “Fluid Mechanics” 9th Editation, McGraw-Hill International Book company.

[38] Wilcox D. C., (1993) “Turbulence Modeling For CFD”.

[39] Yakhot, Y. and Orszang, S.A. (1986) “Renormalization Group Analysis of Turbulence”J. Scientific Computing.

[40] Izadinia, Elham, and Manouchehr Heidarpour. (2012), "Simultaneous use of cable and collar to prevent local scouring around bridge pier." International Journal of Sediment Research 27, no. 3 394-401.

Abstract

The displacement of sediment particles due to varying flow pattern change is called scouring. This phenomenon is one of the reasons for the instability of the bridges and, finally, their failure. Therefore, it is important to provide methods to control and reduce scouring. The use of equipment such as sacrificial piers in front of the piers of bridges to provide bridges' stability can be a good solution to this goal. In this research, we first modeled the experimental model with the Flow 3D software and compared and validated it with the results. To do this, we studied and analyzed the depth of the scour hole in the following scenarios which the rate of reduction of scour depth in each state is expressed: 1. In the case of single-pier with sacrificial piers and without sacrificial piers, 54% 2. In the case of two piers with sacrificial piers and without sacrificial piers, on the first pier, 46% and on the second pier, 27%, the cause of the decrease in efficiency can be expressed by the re-formation of the developed current downstream of the first pier. 3. In the case of three piers with sacrificial piers and without sacrificial piers, on the first pier, 48% on the second pier, 28% on the third base % 31 ,The cause of the reduction of the effect is the presence of the first pier against the flow, which acts like the bigger sacrificial pier.

Keyword: Scour, FLOW-3D, single-pier, double-pier, triple-pier, sacrificial piers.

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Water Engineering and Hydraulic Structures

Numerical investigation of the effect of the sacrificed piles on the local scour control in the cylindrical piles group

By:

Mehrdad Rezaiyan

Supervisor:

Amirabbas Abedini

February 2019