

آنالیز عملکرد طوق و شکاف در کاهش آبشستگی اطراف پایه پل‌ها به کمک نرم‌افزار SSIIM

کورس نکوفر^۱، فرشید پولادی^۲، مهرناز روزبهانی^۳

۱- عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس، دانشکده فنی و مهندسی، nekoufar@iauc.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد لارستان

۳- کارشناسی ارشد، پژوهشگاه هوافضا

چکیده

فرسایش بستر و حمل مواد جدا شده از آن به وسیله جریان آبشستگی نامیده می‌شود به دلیل اینکه یکی از مهم‌ترین دلایل تخریب پل‌ها به خصوص در مواقع سیلابی، آبشستگی موضعی اطراف پایه پل است، تعیین عمق آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل، نقش بسیار مهمی در طراحی پل‌ها در مقابل این پدیده مخرب ایفا می‌کند. به همین دلیل ارائه روش‌هایی برای کنترل و کاهش این پدیده حائز اهمیت است. با استفاده از نرم‌افزار SSIIM که یک نرم‌افزار سه-بعدی با قابلیت زمانی است، آبشستگی و کاهش آن با استفاده از طوق و شکاف بررسی می‌شود. مشخص شد که استفاده همزمان از طوق و شکاف تأثیر محسوسی بر کاهش عمق آبشستگی دارد و نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی تفاوتی حدود ۲۰ تا ۲۵٪ با نتایج مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: عمق آبشستگی، طوق، شکاف، نرم‌افزار SSIIM

۱- مقدمه

برای تهدید یکپارچگی سازه‌های هیدرولیکی و پل‌ها را دارد که در نهایت پس از اینکه فونداسیون سازه‌ها تخریب شد و زیرسازی‌ها از بین رفت، منجر به شکست کامل سازه می‌شود.

از آنجایی که گسترش چاله فرسایشی پایداری سازه پل را به مخاطره می‌اندازد، پیش‌بینی میزان گودافتادگی و اتخاذ تدابیر لازم برای مهار آن از جمله اقدامات مهندسی متداول در عرصه مهندسی رودخانه تلقی می‌شود و به همین دلیل همچنان مورد توجه خاص محققان علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه است.

جریان منظم و یکنواخت رودخانه پس از برخورد با پایه پل دچار دگرگونی می‌شود و بر اثر انحراف خطوط جریان و تشکیل لایه مرزی ناحیه پرفشار در بالادست پایه و ناحیه کم‌فشار در پایین دست آن رخ می‌دهد. این امر سبب تشدید گردان فشار و به وجود آمدن نوعی

جریان در کانال‌ها و مجاری روباز با بستر متحرک اغلب توام با انتقال رسوبات است. آبشستگی معمولاً بر اثر تغییر در خصوصیات جریان در کانال یا در نتیجه فعالیت‌ها و اعمال بشری مانند ساخت سازه‌ها در کانال یا برداشت مصالح از بستر رودخانه اتفاق می‌افتد. آبشستگی به صورت فرسایش رسوبات بستر رودخانه حول یک مانع در میدان جریان تعریف می‌شود.

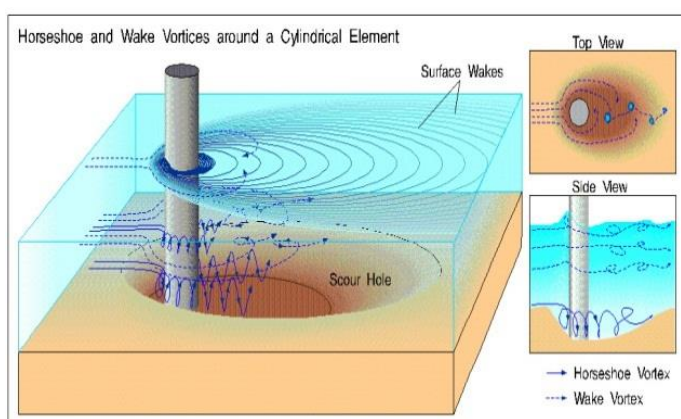
پل‌ها از جمله مهم‌ترین و پرکارترین سازه‌های رودخانه‌ای هستند و به عنوان کلید راه‌های ارتباطی از اهمیت زیادی برخوردار هستند. هر ساله با وقوع سیلاب در هر رودخانه تعداد زیادی از این پل‌ها، درست زمانی - که بیشترین نیاز به آنها وجود دارد تخریب می‌شود. شکست پل‌ها در اغلب موارد بر اثر فرسایش مصالح بستر حول پایه و فونداسیون پل‌ها در شرایط جریان سیلابی اتفاق می‌افتد. مکانیسم فرسایش پتانسیل کافی

رشته های گردابی موجود در جریان اصلی (جریان یکنواخت بالادست) موثر است.

در شکل ۱، میدان جریان تولیدشده در اطراف پایه پیل از سه ناحیه مشخص تشکیل شده است. در رویه بالایی بخشی از جریان پس از برخورد با پیشانی پیل به سمت پایین منحرف می شود و ناحیه جریان پایین رو را تشکیل می دهد [۱].

جریان ثانویه در اطراف پایه پیل می شود که اصطلاحاً به گرداب نعل اسبی شناخته می شود.

وقوع چنین پدیده ای ناشی از ویژگی توزیع سرعت و کاهش مقدار آن در مجاورت بستر در جریان یکنواخت بالادست است که به نوبه خود عدم توازن در فشارهای دینامیک را همراه دارد. گرداب نعل اسبی بخش مهم دیگری از میدان جریان ایجادشده در اطراف پایه پیل است. این جریان پیچشی قوی از نوع سه بعدی بوده و در تشکیل آن جریان پایین رو و همچنین، تمرکز



شکل ۱- الگوی سه بعدی جریان حول پایه پیل [۱]

۳- پارامترهای رسوب: توزیع دانه بندی، چگالی رسوبات، شکل ذرات، زاویه ایستایی ذرات.

۴- پارامترهای سیال: جرم واحد حجم سیال، شتاب ثقل، لزجت سینماتیکی.

کوچک زاده و همکاران (۱۳۸۱) با بهره گیری از داده های موجود، امکان استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین میزان عمق آبستگي را بررسی کردند. نتایج نشان داد که برآوردهای حاصل از شبکه تطابق خوبی با اندازه گیری ها دارد و از نتایج رگرسیون^۱ چندمتغیره خطی هم بهتر بود. همچنین، آنالیز حساسیت روی پارامترهای موثر بر پدیده نشان داد که انحراف معیار هندسی ذرات بستر بیشترین تأثیر را بر نتایج دارد و عوامل تأثیرگذار دیگر مانند سرعت جریان، قطر

الگوی جریان و مکانیزم آبستگي در اطراف یک پایه پیل و تکیه گاه پیل پدیده ای پیچیده است که در نتیجه عکس العمل قوی بین جریان آشفته سه بعدی در اطراف پایه پیل و کف قابل فرسایش، حاصل می شود. آبستگي موضعی در اطراف پایه های پیل به وسیله جریان زیرین و گردابه های نعل اسبی رخ می دهد.

شفاعی بجستانی (۱۳۸۴) پارامترهای ذکر شده را در ۴ گروه به صورت زیر دسته بندی کرده است [۲]:

۱- پارامترهای هیدرولیکی: شدت و عمق جریان، سرعت برشی و سرعت متوسط و ضریب زبری.

۲- پارامترهای هندسی: اندازه پایه، شکل پایه، زاویه محور پیل با جهت جریان، فاصله پایه ها.

¹ Regression

به پایه، شکل پایه و تأثیر مواد شناور (بخشها و آشغالها) در جریان بیان کردند [۶].

اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۸)، عمق حفره آبشستگی در طول زمان هیدروگرافهای مختلف در اطراف پایه استوانه‌ای را به کمک مدل عددی SSIM^۱ شبیه‌سازی کردند. نتایج مدل عددی با اطلاعات آزمایشگاهی در دسترس مقایسه شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که نتایج مدل عددی در شاخه صعودی هیدروگرافها در تمام شرایط بسیار خوب است، ولی دقت نتایج مدل عددی در شاخه نزولی به نوع هیدروگرافهای جریان وابسته بود. این در حالی است که قسمت عمده آبشستگی در محل پایه پل در شاخه صعودی اتفاق می‌افتد [۷].

صیادی (۱۳۸۷) شبیه‌سازی ریاضی د بعدی برای محاسبه آبشستگی موضعی در اطراف پایه‌ی پل‌ها تهیه کرد. از معادله ناویر - استوکس^۲ به عنوان معادله‌ای استفاده شد که میدان سرعت را شبیه‌سازی می‌کند. در ابتدا معادله ناویر - استوکس حل شد و میدان سرعت به دست آمد. سپس، از سرعت‌های حاصله در صفحه افقی، به عنوان داده‌های ورودی در حل معادله انتقال رسوب و از روش معیار باقی‌مانده‌های وزنی گالرکین، برای مرتب کردن تغییرات معادله‌های ناویر- استوکس استفاده شد. دامنه بررسی به هشت واحد گرهی تقسیم و از توابع مرتبه دوم برای سرعت‌ها و خطی برای فشار، استفاده شد [۸].

۱-۱- استفاده از طوق در کنترل آبشستگی

طوق‌ها ابزاری هستند که موازی با کف رودخانه و عمود بر پایه نصب و می‌توانند در دماغه بالادست پایه، جلوی جریان رو به پایین را بگیرد و مانع از حفر گودال آبشستگی توسط آن شود [۹]. یک طوق در هر سطحی نسبت به بستر که نصب شود، جریان را به دو ناحیه بالا و پایین طوق تقسیم می‌کند. ناحیه بالای طوق به عنوان

متوسط ذرات، قطر پایه و عمق جریان در مراتب بعدی قرار می‌گیرد [۳].

ارونقی و همکاران (۱۳۸۸) با بکارگیری طوق مستطیلی در پایه استوانه‌ای، مشاهده کردند که طوق، سرعت آبشستگی و عمق حفره آبشستگی اطراف پایه پل را کاهش می‌دهد و ابعاد طوق نقش زیادی در کاهش آبشستگی اطراف پایه پل دارد. طول طوق در بالادست و پایین دست مدل پایه پل و همچنین، عرض طوق بررسی شد. مقادیر مناسب طول طوق مستطیلی در بالادست و پایین دست که نسبت به بدنه مدل پایه پل اندازه‌گیری شدند، به ترتیب ۰/۹۲ و ۱/۴۲ برابر قطر پایه تعیین شدند. همچنین، عرض مناسب طوق نیز ۳ برابر قطر پایه پل برآورد و. پس از ۶۲ ساعت، آبشستگی ناچیزی در اطراف مدل پایه پل مشاهده شد [۴].

ارونقی و همکاران (۱۳۸۷) تغییرات زمانی عمق آبشستگی اطراف پایه پل، در شرایط آبشستگی آب زلال را بررسی قرار کردند. آزمایش‌ها مؤید این موضوع بود که بیش از ۸۰٪ عمق آبشستگی در ساعت اول رخ داد و پس از آن سرعت آبشستگی به شدت کاهش یافت. تعریفی برای زمان تعادل عمق آبشستگی ارائه و سپس با تعاریفی که محققان برای آن مطرح کرده‌اند مقایسه شد [۵].

نتایج حاصل نشان داد که طبق تعاریف محققان، زمان تعادل عمق آبشستگی را اغلب بسیار کوچک بیان می‌کنند. عمق تعادل آبشستگی در حالت‌های مختلف استخراج و با روابط پیشنهادی محققان مقایسه شد که همخوانی مناسبی را نشان داد. رابطه‌ای تجربی برای تغییرات زمانی عمق آبشستگی ارائه شد و مقایسه این رابطه با روابط موجود نتایج قابل قبولی را نشان داد.

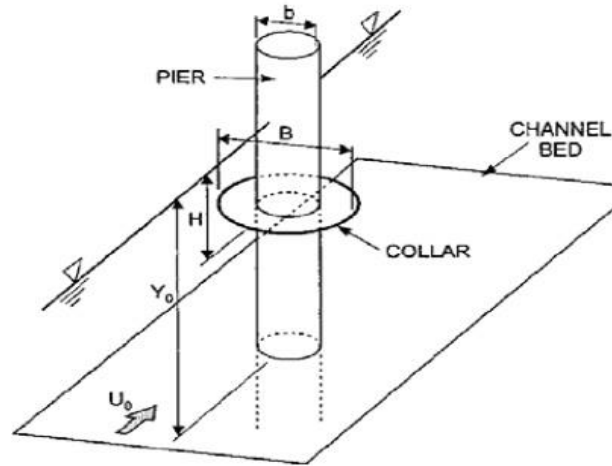
رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) پارامترها را به صورت سرعت جریان، عمق جریان، عرض یا قطر پایه، شتاب ثقل، طول پایه (اگر پایه در جهت جریان زاویه داشته باشد)، اندازه دانه‌بندی ذرات بستر، زاویه برخورد جریان

^۱ Sediment Simulation In Intake with Multi Block Option

^۲ Navier-Stokes

می‌دهد. در ناحیه پایین طوق، قدرت جریان رو به پایین و در نتیجه گرداب نعل اسبی کاهش می‌یابد [۱۰].

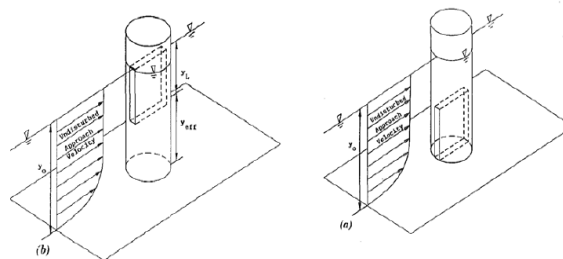
یک مانع در مقابل جریان رو به پایین عمل می‌کند و قدرت جریان رو به پایین را بر اثر برخورد با طوق کاهش



شکل ۲- نصب طوق روی پایه [۱۰]

آبشستگی می‌شود. شکاف نزدیک سطح آب موجب کاهش عمق موثر جریان و کاهش گرادیان فشار می‌شود و در نتیجه شدت جریان رو به پایین را کاهش می‌دهد و بدین ترتیب باعث کاهش عمق آبشستگی خواهد شد [۱۰]. مکانیزم عملکردی در شکل ۳ مشخص شده است.

چیو (۱۹۹۲) برای اولین بار از شکاف (سوراخ درون پایه) به عنوان یکی از روش‌های پیشگیری و کاهش آبشستگی استفاده کرد. وی بیان کرد که اگر شکاف نزدیک بستر باشد با ایجاد جهت جریان افقی، جریان رو به پایین که عامل اصلی ایجاد گرداب نعل اسبی و یکی از عوامل فرسایش اطراف پایه است را به فاصله‌ای دورتر از پایه منحرف می‌کند و سبب کاهش عمق



شکل ۳- (a) شکاف نزدیک بستر، (b) شکاف نزدیک سطح آب [۱۰]

در اغلب تحقیقات تأثیر استفاده از طوق و شکاف در کنترل و کاهش آبشستگی حول پایه پل از روش‌های مدل‌سازی آزمایشگاهی و مشاهدات صحرائی استفاده شده است و به همین دلیل در این تحقیق عملکرد طوق

محققان برای جلوگیری و کاهش آبشستگی اطراف پایه پل روش‌های مختلفی را ارائه کرده‌اند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به استفاده از سنگچین، صفحات مستغرق، شمع‌های حفاظتی، شکاف و طوق اشاره کرد.

در تحقیق حاضر با استفاده از مبانی هیدرولیکی مربوط به آبشستگی حول پایه پل و نیز مطالعات محققان دیگر در زمینه استفاده از طوق و شکاف در آبشستگی داده مربوطه تهیه و سپس، عملکرد استفاده همزمان از این دو روش با استفاده از مدل سه بعدی SSIIM تجزیه و تحلیل شد.

۲-۲-۲- مدل ریاضی تحقیق

در این تحقیق برای شبیه‌سازی میدان جریان از مدل SSIIM که یک مدل سه‌بعدی برای شبیه‌سازی میدان جریان و انتقال رسوبات با قابلیت استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف است، استفاده و نتایج مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده ارزیابی شد.

در این قسمت معادلات سه‌بعدی جریان و انتقال رسوب که در مدل عددی سه‌بعدی حل و ارائه و همچنین، روش حل عددی آنها ارائه می‌شود. مدل ریاضی سه‌بعدی استفاده‌شده در این تحقیق مدل SSIIM است. نسخه مقدماتی این مدل در سال ۱۹۹۱-۱۹۹۰ در انستیتو تکنولوژی نروژ^۱ توسط اولسن^۲ و ملائین^۳ تهیه شده و در سال‌های مختلف توسعه یافته است. مدل معادلات ناویر-استوکس و مدل‌های آشفتگی را با استفاده از یک شبکه سه‌بعدی غیرمتعامد جابجانشده حل می‌کند. برای گسسته‌سازی نیز از روش حجم کنترل استفاده می‌شود. روش SIMPLE برای ارتباط جمله فشار و سرعت به کار برده شده است. با استفاده از روش حل ضمنی میدان سرعت محاسبه و مؤلفه‌های سرعت در حل معادلات انتقال و پخش برای اندازه‌های مختلف رسوب استفاده می‌شود. نرم‌افزار SSIIM هم از شبکه سازمان یافته^۴ در مدل SSIIM1 و هم بی‌سازمان^۵ در مدل SSIIM2 برای حل معادلات استفاده می‌کند. معادلات جریان در این نرم‌افزار،

و شکاف در کاهش آبشستگی پایه پل با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی عددی مطالعه شده است. برای مدل‌سازی و انجام تحلیل‌ها از نرم افزار سه بعدی SSIIM استفاده و عملکرد استفاده همزمان از طوق و شکاف در کاهش آبشستگی بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

تعداد زیاد پارامترهای موثر بر پدیده آبشستگی بر پیچیدگی آن می‌افزاید. از این‌رو، به یک مدل عددی توانمند نیاز است تا با استفاده از گسسته‌سازی معادلات حاکم بر میدان جریان و رسوب و اعمال یکسری فرضیات ساده‌کننده (چشمپوشی از اثرات تراکم‌پذیری، ثابت در نظر گرفتن لزجت دینامیک سیال و لحاظ کردن سیال نیوتنی [۱۱])، روابط پیچیده حاکم بر این پدیده را به معادلات ساده و قابل حل تبدیل کند. کد عددی سه‌بعدی SSIIM می‌تواند پاسخگوی بسیاری از نیازها در زمینه‌های مختلف هیدرولیکی مانند آبشستگی در اطراف پایه پل‌ها باشد. الگوی جریان سه‌بعدی و آبشستگی تحت شرایط آب صاف در اطراف گروه شمع با استفاده از مدل عددی SSIIM شبیه‌سازی شد. مدل عددی، معادلات سه‌بعدی ناویر-استوکس را برای جریان همراه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ حل می‌کند.

۲-۱- کلیات مواد و روش تحقیق

در اغلب تحقیقات برای مطالعه تأثیر استفاده از طوق و شکاف در کنترل و کاهش آبشستگی حول پایه پل از روش‌های مدل‌سازی آزمایشگاهی و مشاهدات صحرائی استفاده شده است و به همین دلیل در این تحقیق عملکرد طوق و شکاف در کاهش آبشستگی پایه پل با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی عددی بررسی شده است.

¹ Norwegian Institute of Technology

² Olsen

³ Melaaen

⁴ Structured Grid

⁵ Unstructured Grid

استفاده خواهد شد. جمله تنش آشفتگی رینولدز با استفاده از مفهوم لزجت گردابه‌ای و فرضیه بوسینسک تعیین می‌شود [۱۱].

۲-۴- مجموعه داده‌های آزمایشگاهی استفاده-

شده در تحقیق

ابعاد کانال آزمایشگاهی استفاده شده (شکل ۴) ۱۰ متر طول، ۳۰ سانتی متر عرض و ۵۰ سانتی متر ارتفاع بوده است. دیواره کانال شیشه‌ای که امکان رؤیت جریان را فراهم می‌کرد و کف آن از فلز است. منبع تغذیه یک پمپ، با حداکثر ظرفیت ۲۴ لیتر در ثانیه است. سیستم مدار بسته جریان امکان تداوم آزمایش‌ها را برای زمان طولانی فراهم می‌کرد. توسط یک شیرفلکه که روی لوله رانش سیستم پمپاژ قرار داشت، دبی کنترل می‌شد. دبی جریان توسط یک سرریز لبه تیز اندازه‌گیری شده است. با توجه به آنکه در بازه آزمایشی ارتفاع رسوبات قرار داده شده نزدیک به ۱۶ سانتی متر در نظر گرفته شده بود، با استفاده از صفحات پلکسی‌گلاس قسمت بالادست و پایین دست بازه آزمایش به میزان ضخامت مواد ۱۶ سانتی متر بالا آورده شد. برای آب‌بندی صفحات نصب شده با جداره کانال از چسب آکواریوم استفاده شد. کف جدید کانال در پایین دست با شیب ملایم به قسمت خروجی و پشت دریچه کنترل که در تراز پایین قرار دارد، کاهش ارتفاع می‌دهد و سطح بالایی قسمت بالادست و پایین دست بازه آزمایش توسط ذرات استفاده شده در بازه آزمایش ریز شد. برای توسعه یافتگی کامل جریان بازه آزمایشی به طول ۱/۵ متر در فاصله ۵ متری از ابتدا براساس نتایج خدشناس و اسماعیلی در نظر گرفته شد [۱۲].

معادلات متوسط‌گیری شده زمانی ناویر - استوکس معروف به معادلات رینولدز^۱ (RANS) است. فرم کلی این معادلات شامل یک معادله پیوستگی و سه معادله مومنتم در سه جهت به شرح زیر است [۱۱].

۲-۳- معادلات حاکم و حل عددی آنها در مدل سه بعدی

معادلات حاکم استفاده شده در مدل سه بعدی به صورت زیر نوشته می‌شوند [۱۱]:

پیوستگی:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

مومنتم:

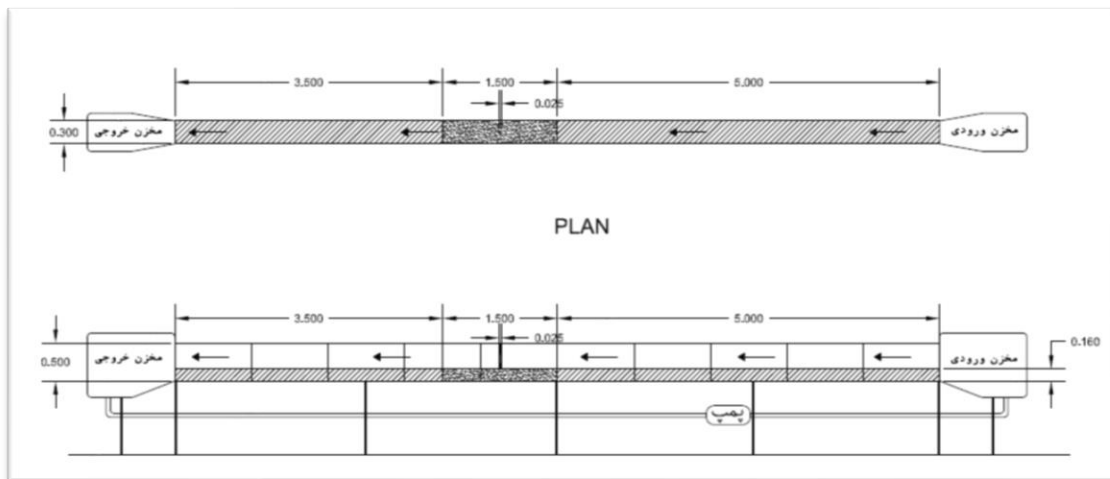
$$\frac{\partial U_i + U_j}{\partial t} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \rho u_i u_j) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

که در این معادلات U_i متوسط زمانی سرعت جریان در جهات سه‌گانه، x مختصه مکان، t زمان، P فشار، δ دلتای کرانکر^۲ (برای $i=j$ دلتای کرانکر برابر ۱، و در غیر این صورت صفر است)، u نوسان سرعت نسبت به زمان در طول یک بازه زمانی Δt است. در این معادلات جمله اول سمت چپ معادله مومنتم جمله غیردائمی، جمله دوم سمت چپ جمله انتقال^۳، جمله اول سمت راست جمله فشار و جمله دوم سمت راست جمله آشفتگی است که با استفاده از مدل‌های مختلف آشفتگی مانند $\kappa - \epsilon$ یا $\kappa - \omega$ قابل مدل‌سازی است. در مدل عددی حاضر روش حل معادلات بر مبنای حجم محدود ضمنی است و برای کوپل میدان فشار و سرعت از روش‌های SIMPLE و SIMPLC استفاده می‌شود. جمله‌های انتقال با استفاده از روش‌های اختلاف بالادست مرتبه دوم یا الگوی توانی مدل‌سازی می‌شود و برای میان‌یابی نیز از الگوی Rhie and Chow

¹ Reynolds-average Navier-Stokes

² Kronecker delta

³ Convection



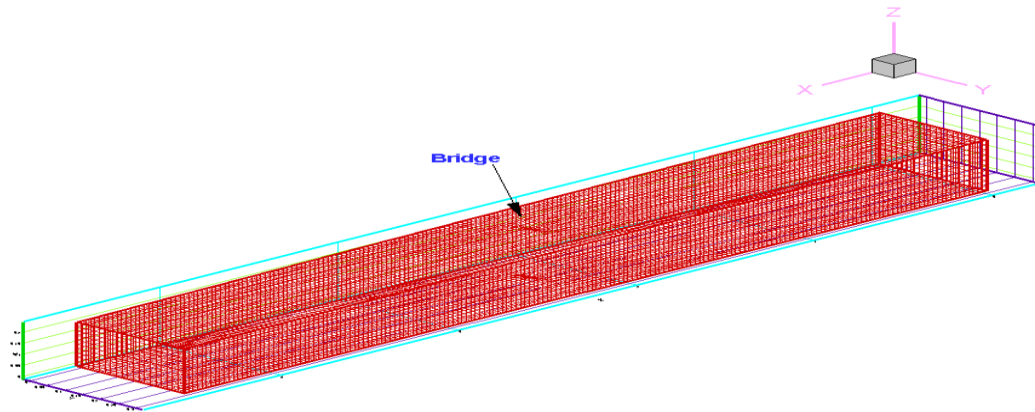
شکل ۴- نما و پلان فلوم آزمایشگاهی

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

ساخت شبکه محاسباتی مناسب اولین و مهم‌ترین مرحله در فرایند تهیه داده‌های ورودی مورد نیاز مدل SSIM است. اندازه، راستا و جهت سلول‌های محاسباتی بر دقت و صحت نتایج مدل تأثیر چشمگیری دارند و همچنین، همگرایی و مدت زمان محاسباتی مدل نیز تابعی از مشخصات شبکه ساخته شده است. برای دستیابی به دقت مطلوب و نتایج بهتر لازم است که شبکه محاسباتی در اطراف و مجاورت پایه پل ریزتر و در نواحی دورتر از آن درشت‌تر و بزرگ‌تر باشند. به همین دلیل در این تحقیق منطقه بالادست به طول ۳/۵ متر و پایین‌دست پایه پل به طول ۲ متر با مش درشت‌تر و منطقه مجاور پایه پل (دو طرف پایه پل با طول ۱/۵ متر) با استفاده از مش ریزتری شبیه‌سازی شده و منطقه اطراف پایه پل که به طول ۱/۵ متر و به ضخامت ۱۶ سانتی‌متر در آن رسوبات قرار دارند نیز با مش ریزتری مدل‌سازی شده است.

در منطقه بالادست و پایین‌دست پایه پل ابعاد مش در راستای طولی ۱۰ سانتی‌متر و در راستای عرضی ۱ سانتی‌متر است. در نواحی مجاور پایه پل، مش ریزتر با ابعاد ۵ سانتی‌متر در راستای طولی و ۱ سانتی‌متر در راستای عرضی به کار رفته است که ابعاد مش در منطقه اطراف پل ۲/۵ در ۰/۵ سانتی‌متر است. مش‌بندی در راستای ارتفاع، برحسب درصد از سطح آب به قسمت‌های ۰ و ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ و ۵۰ و ۶۰ و ۷۰ و ۸۰ و ۹۰ و ۱۰۰ درصد از سطح آب تقسیم‌بندی شد. (در فایل control گزینه 3 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100)

در نهایت با اتصال سه مش محاسباتی به یکدیگر و امتداد آن تا انتهای پایین‌دست فلوم، مش محاسباتی کل محدوده شبیه‌سازی حاصل می‌شود که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- مش تولیدشده در محدوده اطراف پایه پل

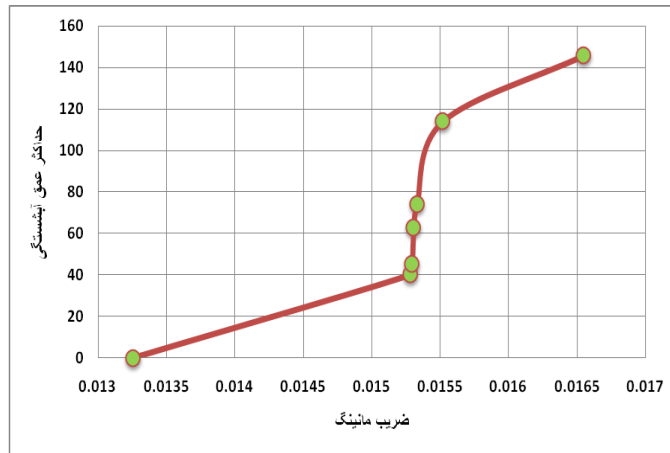
بر میزان آبستگی نخواهد داشت که این معیار نیز رعایت شد.

برای کالیبراسیون عددی مدل حاضر، آبستگی حول پایه پل و در حالت عدم وجود طوق و شکاف بررسی شد. با توجه به توپوگرافی حفره آبستگی ایجادشده اطراف پایه مشخص است که الگوی آبستگی تقریباً متقارن بوده و حداکثر عمق آبستگی در مدل عددی برابر ۴۵ میلی‌متر به دست آمده است که این مقدار در مدل آزمایشگاهی ۵۳ میلی‌متر بوده و نتایج نشان‌دهنده همخوانی نتایج مدل SSIIM پس از کالیبراسیون با داده‌های آزمایشگاهی است. توجه شود که برای کالیبراسیون مدل عددی در این تحقیق ضریب زبری و گام زمانی در محاسبات رسوب تغییر یافت و طوری تنظیم شد که بیشترین همخوانی بین نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی برقرار شود که این مقادیر برای پایه پل بدون حضور طوق و شکاف برای ضریب زبری 0.15296 و گام زمانی 60 ثانیه به دست آمده است.

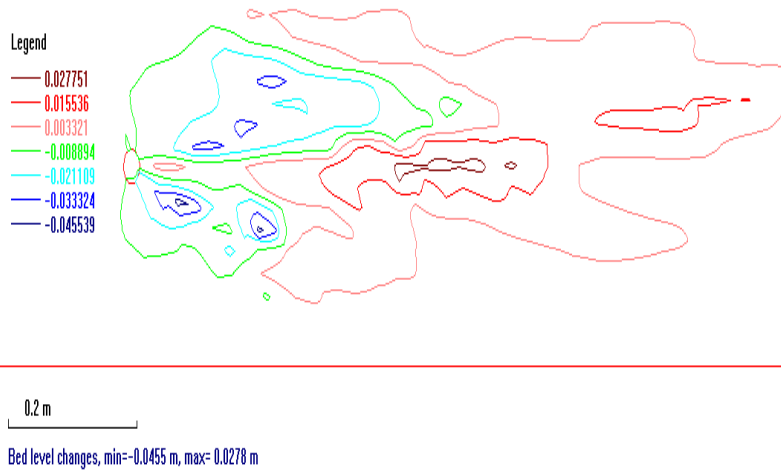
۳-۱- نتایج آبستگی پایه پل بدون وجود طوق و شکاف

برای توسعه کامل جریان، بازه آزمایشی به طول $1/5$ متر در فاصله 5 متر از ابتدای کانال در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از اثر جداره بر میزان آبستگی طبق توصیه چپو و ملویل حداکثر قطر پایه باید 10% عرض کانال باشد [۱۰] و براساس نظر رادکیوی و اما نسبت عرض کانال به قطر پایه باید بزرگ‌تر از $6/25$ باشد [۶]. بنابراین برای مدل کردن پایه از استوانه‌ای به قطر 25 میلی‌متر از جنس پلاستیک تفلون استفاده شد.

برای جلوگیری از تشکیل فرم بستر (ریپل) قطر متوسط ذرات باید از 0.7 میلی‌متر بزرگ‌تر باشد. همچنین، برای حذف اثر رسوبات روی عمق آبستگی نسبت $25-20 > D/d50$ باشد. D قطر پایه و $d50$ اندازه متوسط ذرات رسوب است. بنابراین از رسوباتی با $d50=0.8$ میلی‌متر استفاده شده است. از طرفی اگر عمق جریان از $3/5$ برابر قطر پایه بیشتر باشد، تأثیری



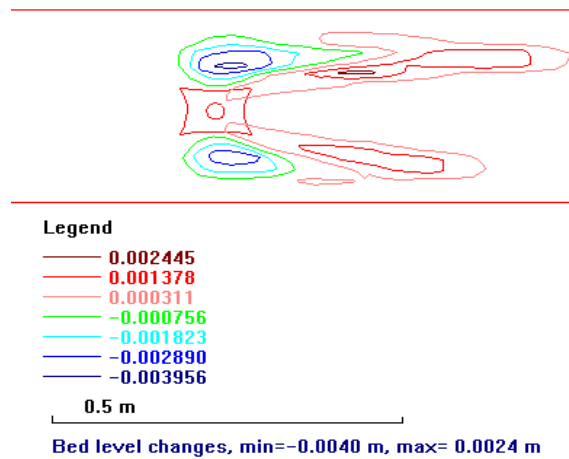
شکل ۶- تغییرات حداکثر عمق آبخستگی حول پایه پل در مقابل ضریب زبری در مرحله کالیبراسیون مدل SSIIM



شکل ۷- آبخستگی حول پایه پل پس از گذشت مدت زمان هفت ساعت در مدل کالیبره شده SSIIM

آبخستگی مجدداً مدل سازی شده است. طول ضلع طوق مربعی اطراف پایه در اندازه ۶/۲۵ سانتی متر انتخاب و نتایج در شکل ۸ ارائه شده است. شایان ذکر است که طوق روی بستر قرار داده شده است.

۲-۳- مدل سازی سه بعدی تأثیر طوق بر آبخستگی پایه پل
 شکل هندسی کانال، ابعاد پایه پل، مشخصات رسوبات و میدان جریان همانند حالت قبل است و در این قسمت تنها طوق مربعی دور پایه پل معرفی و



شکل ۸- فرسایش پایه پل پس از گذشت مدت زمان ۷ ساعت (طوق مربعی ۲۵/۶ سانتی متری)

۳-۳ مدل سازی سه بعدی تأثیر شکاف بر آبشستگی پایه پل

برای مدل سازی سه بعدی تأثیر شکاف بر آبشستگی پایه پل، یک شکاف به پایه پل افزوده و تأثیر استفاده از شکاف بر کاهش آبشستگی اطراف پایه پل با بکارگیری مدل عددی به صورت سه بعدی شبیه سازی شده است. شکاف ایجاد شده دارای عرض یک چهارم قطر پایه (۲۵/۶ میلی متر) و طول دو برابر قطر پایه (۵۰ میلی متر) روی مدل حاصله است. شکاف یک بار در

مجاورت بستر قرار گرفته و یکبار در نزدیکی سطح آب و تأثیر آن بر آبشستگی پایه پل بررسی شده است. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود با استفاده از شکاف در مجاورت سطح آب میزان آبشستگی و فرسایش نسبت به حالتی که شکاف در مجاورت بستر قرار دارد بسیار کمتر است و کارایی استفاده از شکاف در مجاورت سطح آب نسبت به شکاف مجاور بستر بهتر است.



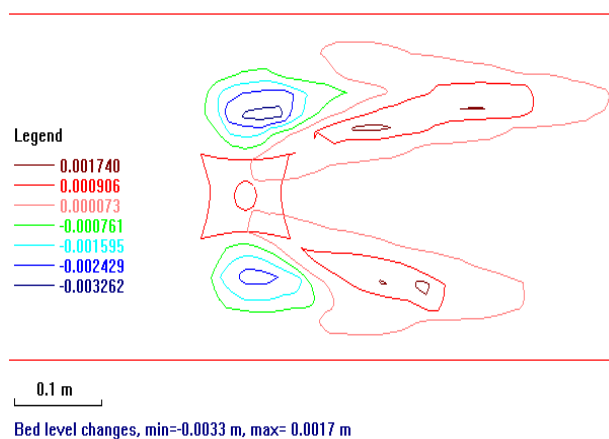
شکل ۹- فرسایش پایه پل پس از گذشت مدت زمان ۷ ساعت (شکاف مجاور سطح آب)

۳-۴- نتایج مدل سازی سه بعدی تأثیر استفاده

همزمان طوق و شکاف بر آبستگي پایه پل

در این قسمت تأثیر قرارگیری همزمان طوق اطراف پایه پل و شکاف در مجاورت سطح آب بر نتایج الگوی جریان و آبستگي بررسی و کارایی آنها در کاهش عمق آبستگي ارزیابی شده است.

با توجه به نتایج حاصل از مدل های عددی، کاهش چشمگیر آبستگي در پایه پل در حالت استفاده از طوق و شکاف ملاحظه می شود (شکل ۱۰). در نهایت با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل عددی و نتایج مدل آزمایشگاهی، حداکثر اختلاف ۲۰ تا ۲۵٪ در حالت های مختلف مشهود است.



شکل ۱۰- فرسایش پایه پل پس از گذشت مدت زمان ۷ ساعت (شکاف و طوق در مجاورت سطح آب)

۴- نتیجه گیری

یکی از ملاحظات بسیار مهم برای طراحی پایه پل- های رودخانه ها بررسی پدیده آبستگي و فرسایش پایه ها و شالوده هاست. با توجه به محدودیت های مدل- های فیزیکی، استفاده از مدل عددی سه-بعدی در مسائل پیچیده مهندسی رودخانه اجتناب ناپذیر است. با این حال کاربرد مدل های عددی سه-بعدی عددی مستلزم شناخت دقت محاسبات و تقریب ها در مسائل مختلف با توجه به فرضیات حاضر و زمان مورد نیاز برای اجرا و امکان عدم هم رایی است. در این پژوهش مدل های عددی سه-بعدی جریان و انتقال رسوب به کار گرفته شده است.

نتایج حاصله نشان می دهد، مدل عددی استفاده- شده که یکی از مدل های سه-بعدی در دسترس مهندسان است، در شبیه سازی جریان، محاسبه سطح آزاد و محاسبه تغییرات توپوگرافی بستر در رودخانه

مقادیری قابل قبول پیش بینی می کند و با اینکه در نواحی دارای جریان های چرخشی شدید، در بعضی نقاط خطای محاسبه سرعت زیاد می شود، ولی مدل می تواند توزیع سرعت و جریان های چرخشی را به خوبی مدل- سازی کند.

۱- به کاربردن طوق در اطراف پایه پل می تواند با تضعیف جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی سبب کاهش عمق آبستگي موضعی شود.

۲- استفاده از طوق مربعی در کاهش عمق آبستگي تأثیر بسزایی دارد.

۳- استفاده از شکاف سبب ایجاد جریان افقیو در نتیجه جریانات رو به پایین در جلوی پایه را به فاصله دورتر از پایه منحرف و موجب کاهش عمق آبستگي می شود.

۴- استفاده ترکیبی دو حالت طوق و شکاف روی پایه سبب کاهش عمق آبستگي به میزان بیشتری می شود.

مراجع

- ۱- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. ۱۳۸۱. معاونت امور فنی، راهنمای تعیین عمق فرسایش و روش های مقابله با آن در محدوده پایه های پل، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، نشریه شماره ۲۶۰
- ۲- شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۴. هیدرولیک رسوب، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۳- کوچک زاده، ص و لیاقت، ع. ۱۳۸۱. تخمین عمق آبستگي موضعی در اطراف پایه های واقع در مجرای اصلی آبراهه ها به کمک شبکه عصبی مصنوعی، مجله علوم کشاورزی ایران، ص. ۶۲۶-۶۱۷: ۳۳.
- ۴- ارونقی، ه و فرسادی زاده، د، ۱۳۸۸. تعیین ابعاد مناسب طوق مستطیلی در کاهش آبستگي پایه پل، مجله دانش آب و خاک، جلد ۱۹ شماره ۱، ص. ۶۴-۵۱.
- ۵- ارونقی، ه و فرسادی زاده، د، ۱۳۸۷. تغییرات زمانی عمق آبستگي اطراف پایه پل و رابطه تجربی آن، مجله دانش کشاورزی، جلد ۱۸، ص. ۱۰-۱.
- 6- Raudkivi, A. and Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. Journal of Hydraulic Engineering, 109(3): 338-350.
- ۷- اسماعیلی، ت. ۱۳۸۸. شبیه سازی عددی هیدرولیکی- هندسی آبستگي در پایه پل های بتنی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران جنوب.
- ۸- صیادی، ا. ۱۳۸۷. حل معادله های میدان جریان و انتقال رسوب در اطراف پایه های پل ها و محاسبه عمق آبستگي موضعی با استفاده از روش عناصر محدود. مجله مهندسی آب، ۸۷-۷۷: ۱.
- ۹- بهشتی، ع.ا. و عطائی آشتیانی، ب. ۱۳۸۷، بررسی عددی الگوی جریان و آبستگي در اطراف گروه شمع، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، اردیبهشت.
- 10-Chiew, Y. (1992). Scour protection at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, 118(9)1260-1269.
- 11-Nils Reidar B. Olsen., 2011, "A Three-Dimensional Numerical Model for Simulation of Sediment movements In Water Intakes with Multi block Option» version 1 & 2
- ۱۲- خدائیان، س.ر. و اسماعیلی، ک. ۱۳۸۸، بررسی عملکرد طوق و شکاف در کاهش آبستگي پایه پل، دانشگاه فردوسی مشهد و شرکت آب منطقه ای خراسان کمیته تحقیقات