

بررسی کارایی روش‌های مختلف کنترل آبشستگی در پل‌های رودخانه‌ای با استفاده از روش عددی

علی اصغر نظری شریبان، دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی پارسیان، قزوین، ایران
فواد کیلانه‌ئی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
امیرحسین عباس‌نیا، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد پردیس، تهران، ایران
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: kilanehei@eng.ikiu.ac.ir

دریافت: 95/12/18 - پذیرش: 96/04/17

چکیده

همه ساله پل‌های زیادی در زمان وقوع سیلاب‌های رودخانه‌ای و بر اثر آبشستگی موضعی پایه‌ها و کوله‌ها تخریب می‌شوند. تاکنون روشهای متعددی برای کاهش و کنترل عمق آبشستگی پیشنهاد و به کار گرفته شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از سنگ‌چین، طوق، ساخت ریزشمع‌ها در جلوی پایه، ایجاد شکاف در پایه، استفاده از کابل، صفحات مستغرق و اصلاح شکل پایه اشاره کرد. در این تحقیق با استفاده از مدل عددی سه بعدی *FLOW-3D* مقدار آبشستگی موضعی در اثر برخورد جریان سیلاب با یک ستون گرد در شرایط آب زلال و بستر ماسه‌ای یکنواخت و برای روشهای مختلف کنترل و کاهش آن محاسبه شده است. جریان حاوی رسوب به صورت جریان دو فاز آب - ماسه در نظر گرفته شده و برای تخمین پارامترهای آشفته‌گی جریان مدل *RNG* مورد استفاده قرار گرفته است. ارزیابی و صحت سنجی مدل عددی نیز با مقایسه نتایج محاسباتی با داده‌های آزمایشگاهی انجام شده است. در ادامه مقادیر آبشستگی موضعی در جلو و پشت پایه در یازده حالت مختلف پیشنهادی کنترل آبشستگی با پایه تنها مقایسه شده است. حالت استفاده از سنگ‌چین با آبشستگی معادل 13 درصد پایه تنها، کمترین آبشستگی و حالت استفاده از تک شمع بقطر نصف پایه در بالادست با آبشستگی معادل 26 درصد پایه تنها، بیشترین آبشستگی را داشته است.

واژه‌های کلیدی: آبشستگی موضعی، پایه پل، کنترل و کاهش آبشستگی، شمع‌های حفاظتی، سنگ‌چین، طوقه دایره‌ای، مدل سازی عددی

1- مقدمه

جریان اطراف پایه به کف بستر و تشکیل گرداب‌های نعل اسبی، چرخشی و برخاستگی می‌شوند. با افزایش سرعت آب در بستر رودخانه، نیروهای برشی وارد بر بستر رودخانه افزایش یافته و پس از غلبه بر نیروهای برشی مقاوم بستر، باعث جدا شدن دانه‌ها، تعلیق و به حرکت درآمدن آنها می‌شوند. این روند به مرور در عمق بستر نفوذ کرده و چنانچه تا تراز پایین پی گسترش یابد موجب کاهش مقاومت باربری خاک زیر پی و نشست پایه، کج شدن و در نهایت تخریب پایه و عرشه پل می‌گردد. دو نمونه از آبشستگی در پایه‌های پل که تخریب آن را نیز به همراه داشته است در شکل شماره 1 ارائه شده است.

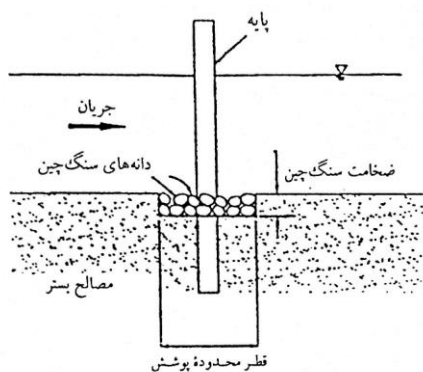
پل، یکی از مهمترین سازه‌هایی است که از دیرباز مورد توجه و نیاز انسان برای عبور از رودخانه‌ها بوده است. علی‌رغم کسب تجربیات زیاد و پیشرفت‌های چشمگیر در محاسبات سازه‌ای و هیدرولیکی، همچنان در اقصی نقاط جهان تخریب پل‌های متعدد در زمان وقوع سیلابها روی می‌دهد. تخریب پل‌ها علاوه بر مسائل اقتصادی، باعث ایجاد معضلات اجتماعی و حتی مخاطرات جانی می‌گردد. طبق تعریف، شسته شدن و جابجائی مصالح بستر رودخانه در اثر جریان آب را آبشستگی می‌نامند. پل‌ها تأثیرات بسیاری بر هیدرولیک و مورفولوژی رودخانه‌ها دارند. وجود پایه‌ها در عرض رودخانه باعث کاهش مقطع عبوری جریان، برخورد جریان به پایه و انحراف خطوط



شکل 1. دو نمونه از تخریب پلها در اثر آبشستگی پایه‌های آن

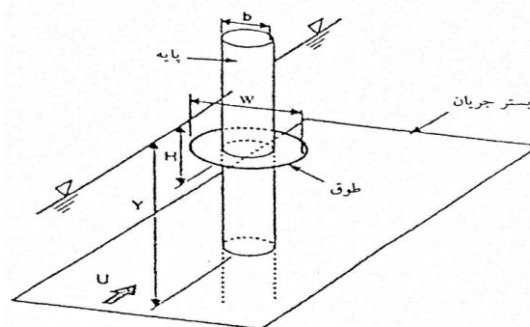
جایگزین شود، در این صورت احتمال شسته شدن بستر بسیار کم می‌شود. سنگ‌چین می‌تواند از مصالح شکسته و یا رودخانه‌ای تشکیل شود. به علت اصطکاک بالا، مصالح شکسته شده مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. برای طراحی سنگ‌چین با توجه به شکل، وزن مخصوص و جنس سنگ‌ها، دو شاخص مهم اندازه سنگ‌دانه‌ها و محدوده سنگ‌چینی تعیین می‌شود. منظور از محدوده، وسعت قرارگیری سنگ‌چین است. این دو شاخص با توجه به شرایط هیدرولیکی و سرعت جریان مشخص می‌شوند. چیو¹ (1992) پایداری سنگ‌چین و فرآیندهای مختلف تخریب آن را مورد بررسی قرار داد. استفاده از گابیون (توری‌سنگی) و سنگ‌های مصنوعی (قطعات پیش-ساخته) نیز مرسوم است. در شکل شماره 2 نحوه عملکرد سنگ‌چین در مقابله با آبشستگی و نمونه‌ای از اجرای آن ارائه شده است.

روشهای مختلفی برای کنترل و کاهش آبشستگی در اطراف پایه‌های پلها توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از سنگ‌چین، طوق، ساخت ریزشمع‌ها در جلوی پایه، ایجاد شکاف در پایه، استفاده از کابل، صفحات مستغرق، اصلاح شکل پایه و ... اشاره کرد. روشهای مذکور به‌طور کلی در قالب اقداماتی برای افزایش مقاومت مواد تشکیل‌دهنده بستر یا اصلاح الگوی جریان در راستای کاهش قدرت عوامل فرسایش و یا ترکیبی از هر دو حالت خواهد بود (M. and Beg, S., 2013). اولین روشی که از دیرباز کاربرد فراوانی در کنترل آبشستگی داشته و مورد استفاده قرار گرفته است، سنگ‌چین است. در این روش مقاومت مصالح بستر در برابر جریان آب افزایش داده می‌شود. طبق نظریه شیلدز، هرچه قطر مصالح بیشتر باشد، برای جابجایی و به حرکت در آوردن مصالح بستر به سرعت برشی بیشتری نیاز است. اگر بستر با ذرات درشت‌تر



شکل 2. استفاده از سنگ‌چین برای مقابله با آبشستگی

تفرج نوروز و همکاران (2010) بررسی جامعی از مطالعات انجام شده بر روی انواع روشهای مختلف تغییر الگوی جریان که به کاهش عمق آبستگي پایه پل منجر می‌شوند، ارائه دادند. استفاده از طوق یکی از روشهای کنترل آبستگي از طریق اصلاح الگوی جریان است. همانگونه که در شکل 3 نشان داده شده است، طوق، صفحه‌ای با ضخامت کم است که دور پایه را می‌پوشاند و به موازات رودخانه و به طور عمود بر پایه در تراز بستر یا نزدیک آن قرار می‌گیرد. نقش اصلی طوق جلوگیری از برخورد جریان رو به پایین به بستر رودخانه است.



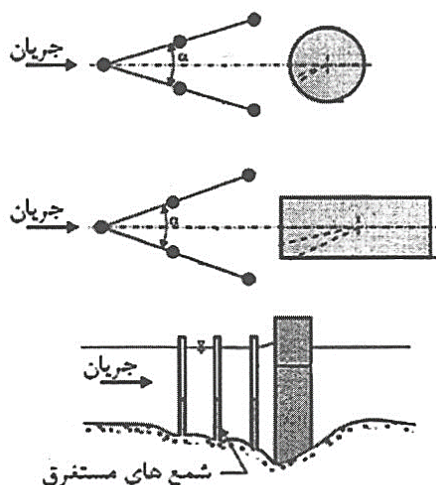
شکل 3. استفاده از طوق جهت کنترل آبستگي

توماس² (1967)، تاناکا و یانو³ (1967)، نیل⁴ (1973)، اتما⁵ (1980) و چيو (1992) نشان دادند که با قرار دادن طوق در دور پایه می‌توان، عمق آبستگي را کاهش داد. سینگ و همکاران⁶ (2001) بررسی‌هایی بر روی طوق جهت کاهش آبستگي به صورت آزمایشگاهی انجام دادند. آزمایش‌های گوناگون توسط محققین مختلف نشان داد که کفایت طوق در جلوگیری از آبستگي تابعی از عرض و ارتفاع آن از سطح بستر است. زراتی و همکاران (2004) اثر طوق بر روی پایه‌های مستطیلی پیشانی گرد را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که هر چه طوق عریض‌تر و پایین‌تر باشد موثرتر بوده و استفاده از طوق موجب افزایش مدت زمان رسیدن به عمق تعادل می‌شود. آنها همچنین دریافته‌اند که هرچه انحراف پایه نسبت به جریان بیشتر باشد، اثر طوق کمتر خواهد بود. پیرمحمدی و حیدرپور (1385) به مطالعه اثر طوق بر گروه پایه پرداختند. در این تحقیق آزمایش‌ها بر روی پایه

تک بدون طوق و گروه پایه دو تایی و سه تایی دارای طوق و بدون طوق انجام گرفت و نتایج حاصله با هم مقایسه شد. زراتی و همکاران (2006) طوق با قطر بیشتر از سه برابر قطر پایه را غیر کاربردی عنوان نمودند. مونکادا و همکاران⁷ (2009) نشان دادند که با افزایش قطر طوق کارایی آن در کاهش عمق آبستگي افزایش می‌یابد. مسجدی و غلامزاده محمودی (1390) اثر طوقه در کنترل آبستگي اطراف پایه پل در قوس رودخانه را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. مطالعاتی در خصوص بررسی اثر همزمان طوق و سنگ‌چین نیز انجام شده است. پارسا بصیر (1383) اثر طوق و سنگ‌چین را توأم بررسی کرد و به این نتیجه رسید که در صورت استفاده از طوق بزرگ با قطری معادل سه برابر قطر پایه، اثر گرداب نعل اسبی و جریان رو به پایین تا زمانی که زیر طوق در پایین دست در اثر گرداب‌های برخاستی خالی نشود به طور کامل محو می‌شود. او همچنین الگوی پوشش سنگ چین دور پایه را بهبود بخشید. زراتی و همکاران (2006) اثر استفاده از طوق‌های مجزا و ممتد به همراه سنگ‌چین را بر روی کاهش عمق آبستگي در گروه پایه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در حالت دو پایه در یک خط، ترکیب طوق ممتد و سنگ-چین منجر به کاهش آبستگي در حدود 50 و 60 درصد برای جلو و پشت پایه می‌شود.

ساخت ریزشمع‌ها در جلو پایه از دیگر روشهای مقابله با آبستگي است. شمع‌های حفاظتی در بالادست پایه‌های پل نصب شده و باعث جدا شدن جریان نزدیک شونده و در نتیجه کاهش قدرت فرسایش جریان رو به پایین و گرداب نعل اسبی می‌گردند. در حقیقت شمع‌ها در بالادست پایه باعث منحرف شدن جریان با سرعت بالا و ایجاد منطقه کم سرعت دنباله‌رو پشت خود شده و عمق آبستگي پایه را کاهش می‌دهند. در شکل شماره 4 نمونه‌ای از نحوه قرار گیری شمع‌های محافظ برای کاهش آبستگي اطراف پایه‌های پل ارائه شده است. تعداد شمع‌ها، اندازه قطر شمع‌ها نسبت به قطر پایه، ارتفاع شمع‌ها و آرایش هندسی

شکست مواجهه است. در شکل‌های 5، 6 و 7 نمونه‌هایی از ساخت رادیه و برید، رادیه و شمع- برید و سد- برید ارائه شده است.



شکل 4. استفاده از ریز شمع‌ها جهت کاهش آبستگي

شکل شماره 6 پل سرقنات واقع بر روی رودخانه دالکی در استان بوشهر را نشان می‌دهد. در پل مذکور به دلیل ضعف در مطالعات، مقطع موجود برای عبور سیلاب کمتر از مقدار مورد نیاز در نظر گرفته شده و آبستگي زيادي در اطراف پایه‌ها روی داده است. در ابتدا برای مقابله با آبستگي روش رادیه و برید متعارف مورد استفاده قرار



شکل 5. استفاده از رادیه و برید جهت حفاظت پل در برابر آبستگي

شمع‌ها نسبت به یکدیگر و نسبت به پایه و نیز زاویه قرارگیری شمع‌ها نسبت به پایه از جمله پارامترهای مهم و موثر در کاهش آبستگي پایه‌های پل در این روش بشمار می‌آیند (Melville and Hadfield, 1999). چابرت و انگلدینجر⁸ (1956) اولین محققینی بودند که عملکرد شمع‌های حفاظتی با آرایش مثلثی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آنان کاهش حدود پنجاه درصد آبستگي را نشان داد. سینگ و همکاران (1995) با انجام آزمایشهایی با شمع‌های محافظ نشان دادند، حداکثر حفاظت برای یک پایه استوانه‌ای به قطر D زمانی حاصل می‌شود، که یک شمع حفاظتی با همان قطر در فاصله دو برابر D بالاتر از پایه نصب گردد. آزم و قمشی (1392) کارایی و تاثیر شمع‌های حفاظتی بر کاهش آبستگي موضعی در اطراف پایه استوانه‌ای و تعیین بهترین قطر و موقعیت قرارگیری این شمع‌ها با آرایش خطی (موازی جریان) در بالادست پایه پل را مورد بررسی قرار دادند. تفرج نوروز و همکاران (2012) عملکرد شش روش مختلف اصلاح الگوی جریان بر روی کنترل و کاهش آبستگي اطراف پایه پل را به صورت آزمایشگاهی بررسی و مقایسه نمودند.

علاوه بر روشهایی که به آن اشاره شد، ساخت رادیه و برید، شمع- برید و سد- برید از دیگر اقدامات حفاظتی برای پایه پل‌هایی است که ضعف‌هایی در مطالعه و طراحی آنها وجود داشته است و در سیلابهای گذشته دچار آبستگي قابل توجه و وسیعی شده‌اند و پل با خطر



شکل 6. استفاده از رادیه و شمع- برید در پل سرقنات استان بوشهر

می‌کند. در شکل شماره 7 عملیات اجرایی ساخت سد- - برید در پل گلال-کهنک واقع در استان خوزستان شهرستان دزفول نشان داده شده است.

اگر چه تاکنون فعالیت‌های زیادی برای یافتن مکانیسم آبستگي در اطراف پایه‌ها و ارائه راهکارهایی برای کاهش این پدیده توسط محققین مختلف صورت پذیرفته است لیکن بررسی کارایی روشهای مختلف کنترل و کاهش آبستگي کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در تحقیق حاضر راهکارهای موجود برای کاهش عمق آبستگي در حالت وجود پی‌های سطحی و نیمه سطحی (پی‌های فاقد شمع) در پایه پل‌های واقع در رودخانه‌ها بررسی و کارایی آنها به صورت عددی ارزیابی و مورد مقایسه قرار گرفته است.

گرفت که عملکرد مناسبی در سیلاب‌های اتفاق افتاده قبلی نداشته و تخریب شده است. در این طرح سطح وسیعی از پایین دست پل، رادیه بتنی به ضخامت 60 سانتیمتر اجرا شده و در انتهای شمع‌هایی به قطر یک متر و عمق 10 متر به فواصل 2 متر از هم بعنوان برید پایین دست ساخته شده است. عملیات مذکور در سال 1383 در استان بوشهر، منطقه سرقنات اجرا گردیده است.

در مواقعی که عرض رودخانه وسیع بوده و سیلابهای معمولی از دهانه‌های محدودی از پل عبور می‌کنند بعضاً آبستگي‌های عمیقی رخ داده و حتی شمع‌های زیر پی نیز نمایان می‌شوند. در این‌گونه موارد معمولاً سازه‌ای شبیه سد انحرافی در پایین دست پل ساخته شده و پشت آن با مصالح نسبتاً درشت پر می‌شود و سطح بستر رودخانه تسطیح شده و سیلاب‌های وارده را در همه دهانه‌ها توزیع



شکل 7. استفاده از سد- برید در پل گلال-کهنک واقع در استان خوزستان

2- معرفی نرم افزار و معادلات حاکم بر جریان

آب و رسوب

یکی از زمینه‌های علمی که با افزایش قدرت محاسبات بشر پیشرفت‌های زیادی در آن صورت گرفت، دینامیک سیالات محاسباتی⁹ (CFD) است. در واقع دینامیک سیالات محاسباتی، علمی است که با بکارگیری فناوری‌های نوین در زمینه علوم رایانه و توانمندی‌های محاسباتی موجود، به حل رفتار سیال می‌پردازد. به بیان دیگر می‌توان گفت که دینامیک سیالات محاسباتی علمی است که به مطالعه عددی پدیده‌های موجود در زمینه سیالات می‌پردازد.

امروزه، دینامیک سیالات محاسباتی به‌عنوان یک ابزار مناسب در کنار روشهای آزمایشگاهی و تحلیلی مطالعه رفتار سیالات بکار گرفته می‌شود و به‌صورت گسترده در زمینه‌های مختلف صنعتی مرتبط با سیالات، انتقال حرارت و انتقال مواد به کمک سیال استفاده می‌شود. از انواع مدل‌های موجود در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان به FLUENT، FIDAP، TELEMAC، PHOENICS، CFX و FLOW-3D اشاره نمود که در مطالعه حاضر از مدل اخیر استفاده شده است. نرم افزار FLOW-3D نرم‌افزاری چند جانبه و سازگار با شرایط پیچیده جریان است که قابلیت تحلیل دو بعدی و سه بعدی میدان جریان را با کاربرد روش حجم محدود داراست. این نرم‌افزار از شبکه‌بندی منظم مستطیلی (المان-های سه بعدی متعامد) بهره می‌گیرد. این شبکه دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه‌سازی عددی است که به کمترین ذخیره حافظه احتیاج دارد. قابلیت مدل سازی سه بعدی جریان، مدل سازی رسوب به صورت بار بستر و بار معلق، اعمال سازه با هر شکل و قالب مورد نظر کاربر، پردازش اطلاعات به صورت چند هسته‌ای، استفاده از روش VOF (روش حجم سیال) برای مدل سازی سطح آزاد آب و استفاده از تکنیک FAVOR (روش کسر مساحت-حجم مانع) برای شبیه‌سازی سطوح و اجسام صلب از جمله

دلایل انتخاب این نرم‌افزار در تحقیق حاضر بشمار می‌آیند. معادلات حاکم بر جریان سیال همان معادلات پیوستگی و ناویر استوکس در سه بعد است. آشفتگی معمولاً همیشه مشاهده می‌شود و در مدل سازی عددی جریان قابل چشم‌پوشی نیست. در حالت ایده‌آل این امکان وجود دارد که طیف کامل تغییرات آشفتگی را در معادلات بقای جرم و ممتهم مشابه‌سازی شود؛ اما این عمل تنها زمانی امکان‌پذیر است که شبکه‌بندی و منقطع سازی محیط فیزیکی به اندازه‌ای ریز و با دقت باشد که بتوان جزئیات لازم را کسب نمود. معمولاً به علت محدودیت‌های محاسباتی و زمانی، انجام این مهم با تکنولوژیهای حال حاضر غیرممکن است و بنابراین می‌بایست به مدل‌هایی متوسل شد که تأثیر آشفتگی را بر اساس خصوصیات جریان میانگین بیان کنند. در FLOW 3D امکان استفاده از مدل‌های آشفتگی متفاوتی نظیر مدل صفر معادله‌ای، مدل‌های یک معادله‌ای¹⁰، مدل‌های پیشرفته‌تر دو معادله‌ای (مانند $k-\epsilon$ و $k-\omega$)، مدل RNG و مدل گردابه بزرگ¹¹ (LES) فراهم شده است. در این تحقیق، مدل RNG مورد استفاده قرار گرفته است که بر اساس روش‌های نرمال‌سازی گروهی¹² عمل می‌کند (Yakhot and Smith, 1992). این رویکرد از روش‌های آماری برای استخراج معادلات میانگین برای کمیت‌های آشفتگی، مانند مقادیر انرژی جنبشی و نرخ اتلاف آن استفاده می‌کند. در مدل RNG از معادلاتی مشابه معادلات مدل $k-\epsilon$ استفاده می‌شود، با این تفاوت که ثابت‌های معادلات که در معادلات مدل $k-\epsilon$ ، به‌صورت تجربی بدست آمده‌اند، در روش RNG از معادلات و به‌صورت صریح به دست می‌آیند. این روش کاربرد گسترده‌تری نسبت به مدل استاندارد $k-\epsilon$ دارد. به‌خصوص در جریان‌های آشفتگی با چگالی کم و جریان‌هایی که نواحی برشی قوی‌تری دارند، نتایج مدل RNG از دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار است.

برای شبیه سازی فرسایش، انتقال و ته نشین شدن رسوبات در مدل FLOW-3D موارد زیر انجام می‌شود

(Flow-3D Help).

زبان‌های اصلی در بخش راه‌اندازی مدل می‌باشند. در زبانه General کلیاتی نظیر زمان شبیه‌سازی، سیستم واحدهای مورد استفاده، تعداد و نوع سیال مورد استفاده در شبیه‌سازی و تنظیماتی در مورد سرعت محاسبات صورت می‌گیرد. در مدل سازی تحقیق حاضر زمان حل با توجه به آخرین زمان پایداری سیستم 25200 ثانیه و واحد متریک (SI) در نظر گرفته شده است. زبانه Physics یکی از مهمترین قسمت‌های مدل سازی است و جهت تعریف شرایط فیزیکی حاکم بر پدیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهندس شبیه‌ساز باید بر اصول فیزیکی حاکم بر پدیده مورد بررسی، درجه اهمیت هر کدام و فرضیات موجود، آشنایی کامل داشته باشد و بتواند ترکیب درستی از گزینه‌های موجود را انتخاب کرده و آنها را در شبیه‌سازی وارد کند. با توجه به اینکه در مدل سازی حاضر آبشستگی پایه میانی پل مورد نظر می‌باشد چهار گزینه Gravity, Viscosity and Density evaluation و Sediment Scour turbulencه در این سر برگ از درجه اهمیت بالایی برخوردارند. گزینه Gravity جهت اعمال جاذبه زمین در مدل سازی فعال می‌شود، در مدل سازی این مقدار $9/81$ - در جهت عمود بر جریان در نظر گرفته شده است. گزینه Sediment Scour جهت مدل سازی آبشستگی استفاده می‌شود. با انتخاب آن نرم‌افزار اطلاعات مربوط به بستر رسوبات از جمله تعداد لایه‌های رسوبات، قطر ذرات، چگالی ذرات و ... را دریافت می‌کند. این اعداد با توجه به اطلاعات موجود در مدل آزمایشگاهی بدست آمده‌اند. به دلیل وجود دو لایه با چگالی متفاوت (آب و بستر رسوبات) گزینه Density evaluation در مدل می‌بایست فعال شود. گزینه Viscosity and turbulencه نیز به دلیل وجود اغتشاشات و تلاطم در قسمت پایه پل باید در نظر گرفته شود. در مدل‌سازی‌های حاضر از سیستم RNG جهت حل محاسبات مربوط به تلاطم استفاده شده است. نوع سیال مورد استفاده در مدل سازی با استفاده از زبانه Fluid مشخص می‌گردد. در مدل سازی حاضر سیال مورد استفاده آب می‌باشد که این گزینه انتخاب شده است. زبانه

- محاسبه انتقال رسوبات معلق در جریان
- محاسبه ته‌نشینی رسوبات در اثر گرانش
- محاسبه ورود رسوبات به داخل جریان در اثر تنش برشی و آشفستگی جریان
- محاسبه انتقال مواد بستر در اثر غلتش یا جهش نرم‌افزار Flow-3D با استفاده از تقریب حجمی بقای جرم و معادله انتشار- انتقال¹³، میزان تغییرات بستر و انتقال رسوبات را برآورد می‌کند. در این نرم‌افزار رسوبات به دو صورت می‌توانند وجود داشته باشند: رسوبات معلق¹⁴ و رسوبات متراکم¹⁵. رسوبات معلق دارای غلظت پایین بوده و با سیال حرکت می‌کنند. رسوبات متراکم در محل‌های تعریف شده توسط کاربر در مدل قرار می‌گیرند و در اثر تنش برشی جریان در بستر شروع به حرکت می‌کنند.

3- شبیه‌سازی عددی و ارائه نتایج

این بخش به شبیه‌سازی عددی و مطالعه الگوی هیدرودینامیکی حاکم بر میدان جریان آب و رسوب در محل پایه پل اختصاص دارد. این مطالعه زمینه دستیابی به ارزیابی بهتر از فیزیک حاکم بر میدان جریان و همچنین شناخت کامل‌تری از پدیده مورفودینامیک آبشستگی در محل پایه را فراهم می‌نماید. در ادامه این قسمت ابتدا شرح مختصری از مدل‌سازی عددی میدان جریان و رسوب با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D ارائه می‌گردد سپس ارزیابی مدل عددی با استفاده از نتایج مطالعات آزمایشگاهی موجود مورد بررسی قرار می‌گیرد.

3-1- مراحل مدل سازی و تعریف مشخصات مدل

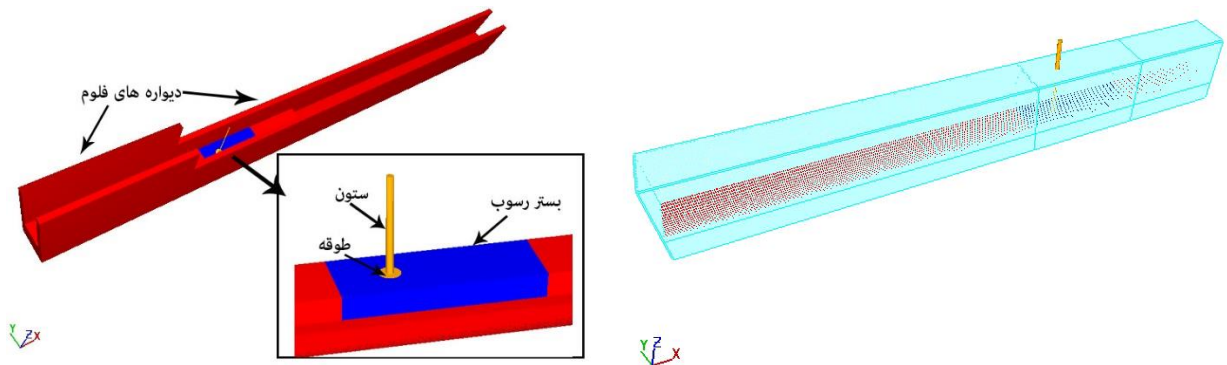
مورد نظر برای شبیه‌سازی

مدل سازی جریان و رسوب در نرم‌افزار FLOW-3D با انجام مراحل که در زبانه‌های مختلف برنامه پیش‌بینی شده است، قابل انجام است. زبانه General, Physics, Meshing & Geometry و Numerics از جمله

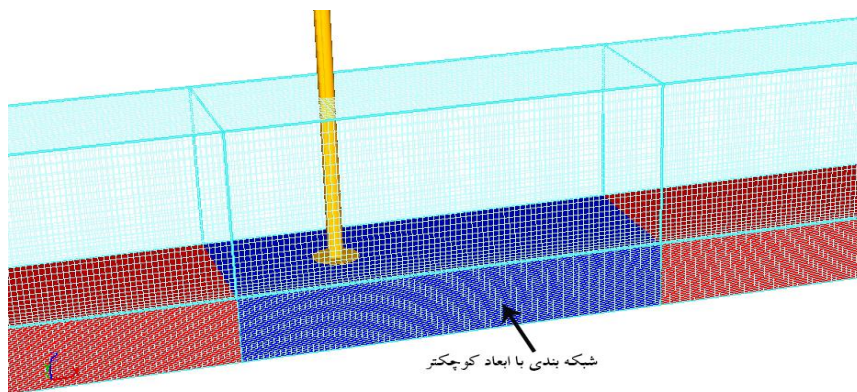
Meshing & Geometry به معرفی هندسه محیط شبیه‌سازی و ایجاد شبکه حل اختصاص دارد. مواردی از قبیل جنس دیوارها، میزان چگالی، ابعاد دیوارها، نوع حرکت سیال و خواص فیزیکی و دینامیکی سیال از قبیل ارتفاع آب، میزان دبی و شدت جریان، شبکه حل و نوع مرزبندی در این قسمت از نرم‌افزار وارد می‌گردد. در شکل شماره 8 نمایی از فلوم مدل سازی شده در نرم‌افزار نمایش داده شده است.

قسمت آبی رنگ موجود در شکل همان بستر آبشستگی می‌باشد، این بستر بصورت Packed sediment به نرم‌افزار جهت بررسی نتایج آبشستگی معرفی می‌گردد. به دلیل حساسیت موضوع آبشستگی و بالا بردن دقت نتایج، از شبکه بندی در نرم‌افزار استفاده شده است، که در قسمت نزدیک پایه ابعاد مربوط به سلول‌های شبکه بندی ریزتر از سایر قسمت‌ها انتخاب شده‌اند تا دقت نتایج

خروجی آبشستگی بالاتر رود. در قسمت آبی رنگ (بستر آبشستگی) جهت بالا بردن دقت نتایج از شبکه‌ای با ابعاد سلول کوچکتر استفاده شده است (شکل شماره 9). تعداد سلول‌های شبکه بندی 1100000 سلول می‌باشد. به منظور انتخاب مقدار بهینه ابعاد سلول‌های شبکه بندی از مقایسه نتایج آبشستگی با نتایج به دست آمده از مدل آزمایشگاهی بهره گرفته شد. در ابتدا ابعاد سلول‌ها بزرگ در نظر گرفته شد و در ادامه ریز کردن سلول‌ها تا رسیدن به نتایج قابل قبول و بدون تغییر ادامه پیدا کرد. مشاهده شد که پس از رسیدن به ابعاد بهینه سلول‌ها، با کوچک تر کردن ابعاد تنها حجم محاسبات و زمان حل افزایش می‌یابد و این تعداد سلول حالت بهینه مدل سازی می‌باشد. در زبانه Numerics روش‌های عددی مختلفی برای حل رفتار سیالات ارائه می‌شود و شرایط مرزی مختلفی را می‌توان به مدل اعمال نمود که در ادامه به آن اشاره می‌شود.



شکل 8. نمایی از مدل سازی و شبکه بندی



شکل 9. نوع شبکه بندی در نزدیک پایه

- V_{fr} (Volume flow rate): از این شرط مرزی برای ورود جریان استفاده شده است.
- Out flow: این شرط مرزی با هدف عدم تاثیر پذیری جریان در شبکه حل از شرایط مرز خروجی بکار رفته است (به عنوان نمونه موج رسیده به مرز بدون هیچ انعکاسی از آن عبور خواهد کرد).
- Wall: این شرط مرزی دقیقاً مشابه یک دیوار عمل می کند که برای سمت راست و چپ و کف فلوم بکار رفته است.
- Symmetry: این نوع شرط مرزی، شرایط بیرون شبکه حل را دقیقاً مشابه شرایط روی مرز داخلی شبکه در نظر می گیرد. از این شرط مرزی برای مرز بالایی شبکه که با هوا در ارتباط است استفاده شده است.
- اجرای شبیه سازی با استفاده از گزینه Simulate در منوی اصلی انجام می گیرد. زمان حل بستگی به نوع شبکه بندی، اندازه و تعداد سلول های حل، تعداد شبکه بندی و ... دارد.

3-2- معرفی مشخصات مدل آزمایشگاهی و ارزیابی

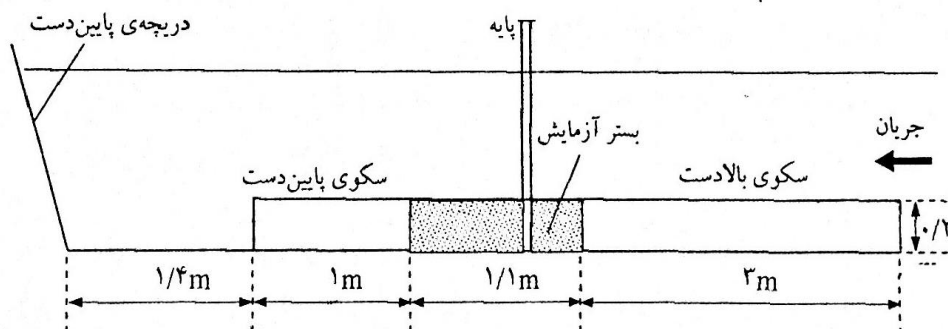
مدل عددی

مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این مطالعه، توسط محمد بلوچی (1386) و در آزمایشگاه مکانیک سیالات و هیدرولیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده است. این محقق بر اساس یک مدل آزمایشگاهی به بررسی میزان جریان عبوری و آبستگي پایه ناشی از تغییرات مورفولوژی بستر آبراهه اصلی

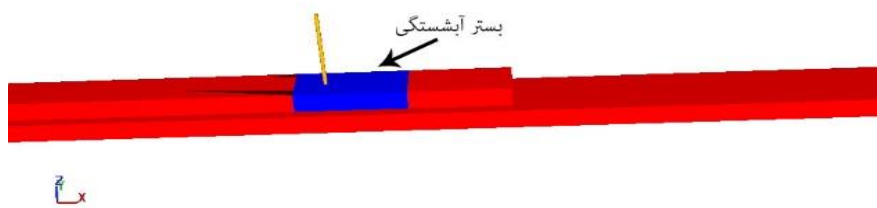
پرداخت.

آزمایش ها در یک فلوم اصلی روباز مستطیلی با جداره شیشه ای به طول 11 متر، عرض 0/405 متر و ارتفاع 1/2 متر انجام شده است. شیب کف کانال صفر و کف آن در محدوده 5/1 متری ابتدایی تا 0/2 متر بالا آورده شده است. محدوده 1/1 متری که ناحیه انجام آزمایش ها است با ماسه ای که متوسط دانه بندی آن برابر 0/72 میلی متر و چگالی ویژه آن برابر 2/65 است، پر گردید و بقیه آن توسط دو سکوی فلزی به طول 3 و 1 متر بالا آورده شد. مدل پایه استوانه ای به قطر 40 میلی متر از جنس پلاستیک تفلون انتخاب شد. جزئیات مربوط به آزمایش در شکل شماره 10 آورده شده است.

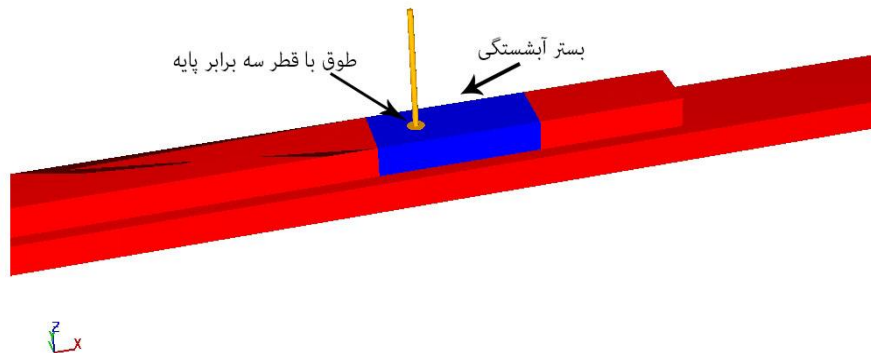
به منظور امکان مقایسه نتایج مدل عددی با نتایج مطالعات آزمایشگاهی، هندسه مدل پایه و کانال و مواد بستر و شرایط جریان در مدل سازی حاضر نیز همانند شرایط آزمایشات موجود در نظر گرفته شد. از بین آزمایش های انجام شده دو آزمایش 1- توسعه آبستگي در حالت بدون طوق و ستون با قطر 40 میلیمتر و 2- توسعه آبستگي در حالت طوق با قطر سه برابر قطر پایه، جهت صحت سنجی و کالیبراسیون نرم افزار انتخاب گردید و توسط نرم افزار FLOW-3D مدل سازی شد. مدت زمان آزمایش نیز بر اساس برقراری شرایط پایدار در میزان جریان عبوری از روی بستر تعیین شده است. در شکل شماره 11 کانال در حالت بدون طوق و ستون با قطر 40 میلی متر و در شکل شماره 12 کانال مدل سازی شده در حالت طوق با قطر سه برابر پایه آورده شده است.



شکل 10. مقطع طولی کانال آزمایشگاهی مورد استفاده و اجزاء آن (بلوچی، 1386)

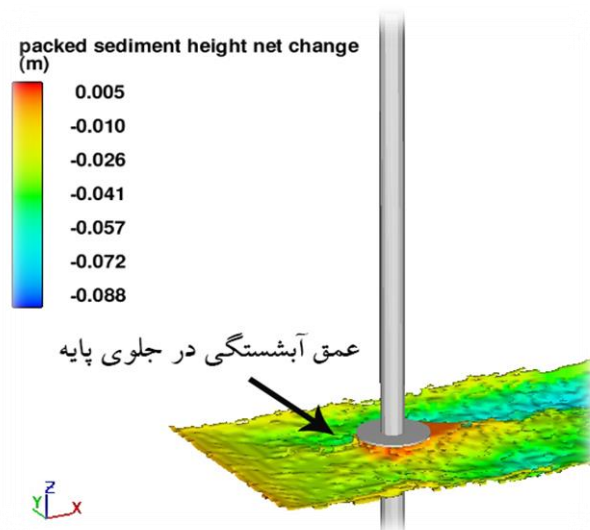


شکل 11. کانال مدل سازی در حالت بدون طوق و ستون با قطر 40 میلی متر



شکل 12. کانال مدل سازی در حالت طوق با قطر سه برابر پایه

در شکل شماره 13 نمونه‌ای از نتایج آبخستگی در حالت طوق با قطر سه برابر پایه در زمان 600 دقیقه آورده شده است.



شکل 13. نتیجه آبخستگی در حالت با طوق در زمان 600 دقیقه

43 میلیمتر بدست آمده است این در حالی است که در مدل سازی عددی و با همین شرایط مقدار آبخستگی 46/2 میلیمتر ثبت شده است. مقایسه نتایج عمق آبخستگی حاصل از مدل عددی و آزمایشگاهی در جلو و

در جدول شماره 1، نتایج حاصل از مدل سازی عددی و نتایج مطالعات آزمایشگاهی در حالت بدون طوق و دبی 45 لیتر بر ثانیه آورده شده است. مقدار آبخستگی ایجاد شده در آزمایشگاه بعد از 15 دقیقه با دبی 45 لیتر بر ثانیه

آزمایشگاهی است.

جدول 2. مقایسه آبستگي در حالت وجود طوق و دبي 25 ليتر بر ثانيه

زمان	حالت	عمق آبستگي	عمق آبستگي
0	آزمایشگاهی	0	0
	مدل سازی	0	0
300	آزمایشگاهی	5	2
	مدل سازی	5/8	2/4
400	آزمایشگاهی	10	4
	مدل سازی	11/3	4/5
420	آزمایشگاهی	14	6
	مدل سازی	15/2	7/4

پس از انجام صحت‌سنجی و اطمینان از عملکرد مناسب نرم‌افزار FLOW-3D در گام بعد اقدام به مدل سازی پدیده آبستگي یک پایه مشخص و در حالت‌های مختلف کنترل آبستگي شد و نتایج مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. در ادامه، مراحل این مدل‌سازی‌ها آورده شده است.

3-3- کاربرد مدل و تحلیل نتایج

در تحقیق حاضر 12 مدل سازی با حالت‌های متفاوت که در ادامه به آن اشاره می‌شود جهت بررسی میزان آبستگي در اطراف پایه پل مورد بررسی قرار گرفت.

1. پایه 4 سانتی متری (حالت طبیعی بدون محافظ)
2. پایه 4 سانتی متری با طوقی به قطر 3 برابر قطر پایه
3. پایه 4 سانتی متری با سنگ‌چینی به ضخامت نصف قطر پایه و 3 برابر در عرض و 4 برابر در طول جریان
4. پایه 4 سانتی متری با سنگ‌چینی به ضخامت نصف قطر پایه و 3 برابر در عرض و 5 برابر در طول جریان
5. پایه 4 سانتی متری با تک شمع به قطر نصف پایه و به فاصله 5 برابر قطر پایه
6. پایه 4 سانتی متری با تک شمع به قطر نصف پایه و به فاصله 4 برابر قطر پایه
7. پایه 4 سانتی متری با تک شمع به قطر نصف پایه و به فاصله 6 برابر قطر پایه

پشت پایه موید دقت مناسب مدل عددی در پیش‌بینی عمق آبستگي در حالت پایه تنها است. جذر متوسط مربع خطاها که با استفاده از رابطه ذیل محاسبه شده است برابر با 3/83 درصد بدست آمده است.

$$(1) \text{ جذر متوسط مربع خطاها} = \frac{\sqrt{\sum (C_i^{nu} - C_i^{ex})^2}}{\sum C_i^{ex}} \cdot 100$$

در رابطه فوق بالانویس‌های nu و ex به ترتیب بیانگر حل عددی و نتایج آزمایشگاهی است

جدول 1. مقایسه آبستگي در حالت بدون طوق و دبي 45 ليتر بر ثانيه

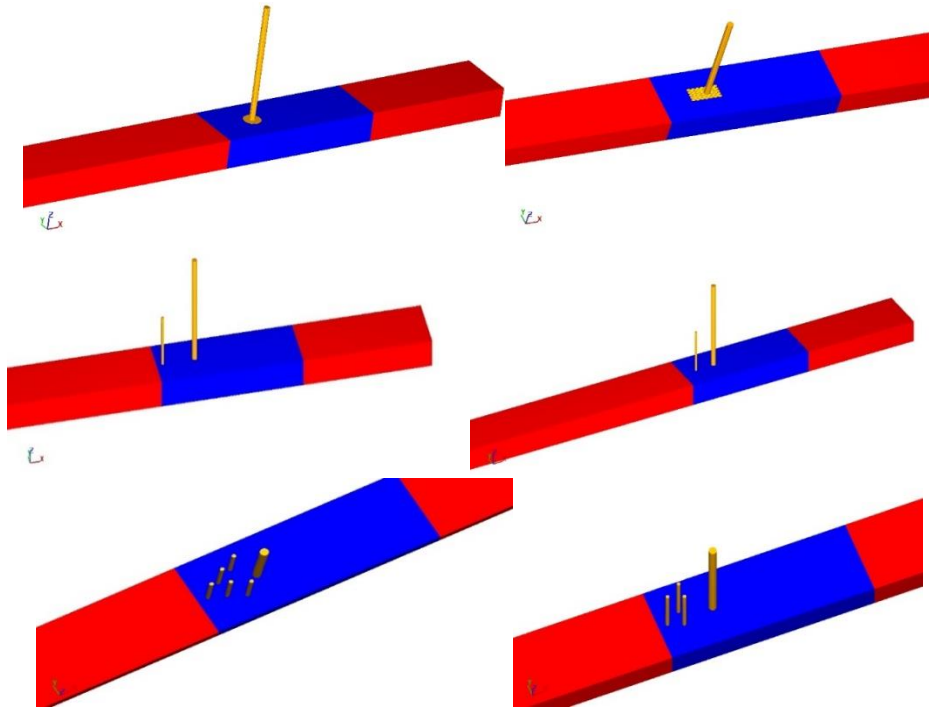
زمان	حالت	عمق آبستگي	عمق آبستگي
0	آزمایشگاهی	0	0
	مدل سازی	0	0
5	آزمایشگاهی	35	5
	مدل سازی	36/8	6/4
10	آزمایشگاهی	41	11
	مدل سازی	44/7	11/9
15	آزمایشگاهی	43	16
	مدل سازی	46/2	17/9

به منظور ارزیابی مدل عددی در حالت وجود المان‌هایی که با هدف کنترل و کاهش آبستگي پایه پل بکار می‌روند، عمق آبستگي در حالت وجود طوق و دبي 25 لیتر بر ثانيه نیز مورد بررسی قرار گرفت. جدول شماره 2 نتایج حاصل از مدل عددی به همراه مطالعات آزمایشگاهی را در جلو و پشت پایه نشان می‌دهد. مقدار آبستگي در مطالعه آزمایشگاهی در جلوی پایه بعد از 420 دقیقه 14 میلیمتر و در مدل سازی عددی 15/2 میلی‌متر است. مقایسه نتایج بیانگر توانایی مناسب مدل عددی در

پیش‌بینی عمق آبستگي در حالت وجود طوق است. جذر متوسط مربع خطاها نیز برابر با 6/43 درصد است. ملاحظه نتایج در جدول‌های شماره 1 و 2 نشان می‌دهد که مقدار آبستگي در جلوی پایه در همه حالات بیشتر از پشت پایه و پیش‌بینی مدل عددی کمتر از نتایج

11. پایه 4 سانتی متری با 5 شمع به قطر نصف پایه و به فاصله 2 و 4 و 6 برابر قطر پایه با آرایش مثلثی
12. پایه 4 سانتی متری با 5 شمع به قطر نصف پایه و به فاصله 4 و 6 و 8 برابر قطر پایه با آرایش مثلثی
- تصاویر نمونه‌هایی از مدل‌سازی‌ها در شکل شماره 14 و نتایج حاصل از آن در جدول شماره 3 آمده است.

8. پایه 4 سانتی متری با 3 شمع به قطر نصف پایه و به فاصله 3 و 5 برابر قطر پایه با آرایش مثلثی
9. پایه 4 سانتی متری با 3 شمع به قطر نصف پایه و به فاصله 2 و 4 برابر قطر پایه با آرایش مثلثی
10. پایه 4 سانتی متری با 3 شمع به قطر نصف پایه و به فاصله 4 و 6 برابر قطر پایه با آرایش مثلثی



شکل 14. نمونه مدل‌سازی‌های انجام شده

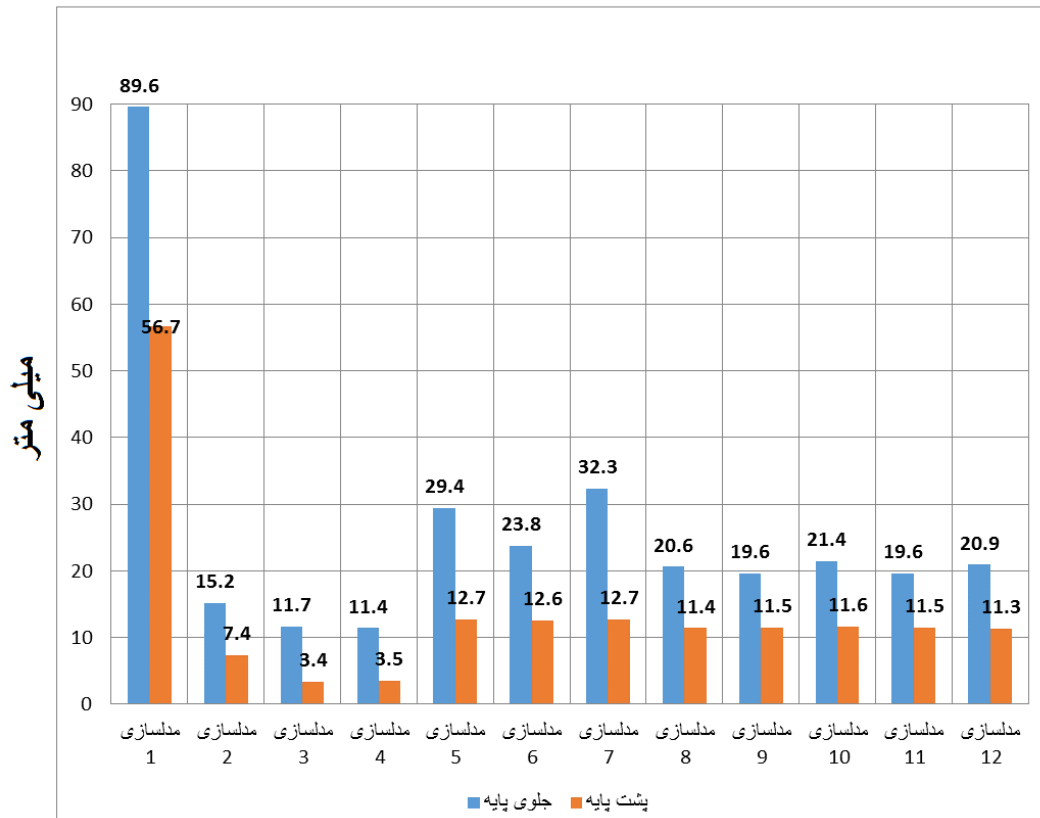
جدول 3. نتایج عمق آبستگي در حالت‌های مختلف مدل سازی

حالت مدل سازی	زمان آبستگي (دقیقه)	عمق آبستگي جلوی پایه (میلیمتر)	عمق آبستگي پشت پایه (میلیمتر)
مدل سازی شماره 1	15	42/6	17/9
مدل سازی شماره 1	420	89/6	56/7
مدل سازی شماره 2	420	15/2	7/4
مدل سازی شماره 3	420	11/7	3/4
مدل سازی شماره 4	420	11/4	3/5
مدل سازی شماره 5	420	29/4	12/7
مدل سازی شماره 6	420	23/8	12/6
مدل سازی شماره 7	420	32/3	12/7
مدل سازی شماره 8	420	20/6	11/4
مدل سازی شماره 9	420	19/6	11/5
مدل سازی شماره 10	420	21/4	11/6
مدل سازی شماره 11	420	19/6	11/5
مدل سازی شماره 12	420	20/9	11/3

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان به این مهم دست یافت که در همه حالت‌ها مقدار آبشستگی در جلوی پایه بیشتر از پشت پایه است. در مدل سازی شماره 1 مقدار آبشستگی پشت پایه نسبت به جلوی پایه در زمان تعادل حدود 63 درصد و در سایر مدل‌سازی‌ها که محافظت از پایه انجام شده است این نسبت بین 29 الی 58 درصد متغیر است. از آنجایی که در تحقیقات آزمایشگاهی و مطالعات انجام شده توسط سایر محققین، استفاده از طوق با سه برابر قطر پایه و جانمایی آن در نزدیکی سطح بستر بیشترین کارایی را در کاهش مقدار آبشستگی داشته است بنابراین در مدل سازی شماره 2 نیز که به بررسی اثر طوق اختصاص دارد، شرایط مذکور لحاظ و مقدار کاهش آبشستگی در جلو طوق در مقایسه با پایه بدون حفاظ 83 درصد بدست آمده است. در مدل سازی های شماره 3 و 4، مقایسه بین دو حالت استفاده شده برای سنگ‌چین نشان می‌دهد که با افزایش طول سنگ‌چین در بالادست نتیجه بهتری بدست می‌آید. مقدار کاهش آبشستگی در جلو سنگ‌چین در مقایسه با پایه بدون حفاظ 87 درصد بدست آمده است. مقایسه نتایج در مدل سازی های شماره 5، 6 و 7 که از تک شمع به قطر نصف پایه در بالادست و در فواصل 4، 5 و 6 برابر قطر پایه استفاده شده است، نشان می‌دهد که کاهش فاصله تک شمع نسبت به پایه اثر بیشتری در اتلاف انرژی آبشستگی دارد. کاهش فاصله در نقطه‌ای به حداکثر کارایی رسیده و از آن به بعد تاثیر آن کاهش می‌یابد تا اینکه به خود پایه برسد. در بهترین حالت، تک شمع کاهش 73 درصدی عمق آبشستگی را در مقایسه با ستون بدون حفاظ نشان می‌دهد. در مدل‌سازی‌های شماره 8، 9 و 10 که از سه شمع به شکل مثلثی در بالادست پایه و در فواصل مختلف استفاده شده مقدار کاهش آبشستگی در بهترین حالت 78 درصد بدست آمده است در این حالت نیز با کاهش فاصله آنها

نسبت به پایه، تاثیر بیشتری در کاهش آبشستگی بدست می‌آید ولی شدت آن در مقایسه با تک شمع بسیار کمتر است. بررسی اثر استفاده از 5 شمع با آرایش مثلثی در بالادست پایه و در فواصل مختلف در مدل سازی های شماره 11 و 12 انجام شده است. مقدار کاهش آبشستگی در بهترین حالت حدود 78 درصد بدست آمده است در این حالت نیز با کاهش فاصله آنها نسبت به پایه تاثیر بیشتری در کاهش آبشستگی ایجاد می‌شود.

مقایسه نتایج 11 حالت مختلف مدل سازی با مدل اولیه که در نمودار شماره 1 نیز ارائه شده است نشان می‌دهد که استفاده از سنگ‌چین با ابعاد و دانه‌بندی مناسب سنگ‌ها بهترین نتیجه را حاصل می‌نماید اما نکته مهم در استفاده از سنگ‌چین تعیین ابعاد و دانه‌بندی صحیح سنگ‌ها است که در همه شرایط رودخانه‌ها یکسان نبوده و امکان خطا و اشتباه در آن وجود دارد. تهیه مصالح، نگهداری و ترمیم مرتب سنگ‌چین نیز مسئله‌ای است که می‌بایست به آن توجه نمود. بررسی نتایج آبشستگی در ریزشمع‌ها که در بالادست پایه قرار می‌گیرند، نشان می‌دهد که مقدار کاهش آبشستگی آنها نسبت به سنگ‌چین کمتر است و در حالت‌هایی که از تعداد شمع‌های بیشتر استفاده می‌شود علاوه بر لزوم دقت بیشتر در طراحی، هزینه اجرای آن نیز افزایش می‌یابد. استفاده از تک شمع علی‌رغم بیشتر بودن مقدار آبشستگی ثبت شده قابل تامل است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از تک شمع با قطر نصف پایه در فاصله 4 برابری قطر پایه، مقدار آبشستگی بوجود آمده آن 26 درصد پایه بدون محافظ است و چنانچه این فاصله به 3 برابر تقلیل یابد مقدار آبشستگی تا 17 درصد قابل کاهش است. با توجه به سهولت طراحی، ساخت و نگهداری آن و کاهش حدود 80 درصدی در آبشستگی پایه پل و هزینه نسبتاً کم ساخت آن استفاده از این حالت مقرون به صرفه بوده و توصیه می‌گردد.



نمودار 1. مقایسه نتایج آبستنگی حالت‌های مختلف مدل سازی

4- نتیجه گیری

در این مطالعه آبستنگی در اطراف پایه پل تحت شرایط آب زلال و بستر ماسه‌ای یکنواخت با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D مدل سازی شد. نتایج مدل عددی با نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده بر روی مدل فیزیکی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نرم افزار FLOW-3D قادر است حداکثر عمق آبستنگی در اطراف پایه‌های پل را در حالت‌های مختلف به خوبی پیش‌بینی نماید. مطابق نتایج بدست آمده بیشترین عمق آبستنگی در جلوی پایه رخ می‌دهد. همچنین توسعه زمانی عمق آبستنگی در ابتدا سریع بوده و سپس کاهش می‌یابد و در نهایت به یک حالت تعادل می‌رسد به طوری که حدوداً 60٪ آبستنگی در کمتر از 0/1 زمان تعادل اتفاق می‌افتد. در مقایسه کلی مشخص شد که کمترین مقدار آبستنگی در حالت استفاده از سنگ‌چین رخ می‌دهد، ولی استفاده از تک شمع در پایین دست پایه پل

به لحاظ اجرایی، اقتصادی و نگهداری می‌تواند دارای بازدهی بیشتر باشد. از نتایج حاصل می‌توان در ساخت پل‌های رودخانه‌ای در شرایط بحران که نیاز به بازگشایی و بهره‌برداری سریع راه‌ها است، استفاده نمود. همچنین می‌توان برای ساخت پل در مناطق صعب العبور و دور افتاده و مناطق محروم، راه‌های روستایی و پل‌های دوران ساخت در پروژه‌های سدسازی استفاده کرد.

5- پی‌نوشت‌ها

- 1- Chiew
- 2- Thomas
- 3- Tanaka and Yano
- 4- Neill
- 5- Ettema
- 6- Singh et al.
- 7- Moncada et al.
- 8- Chabert and Engeldinger
- 9- Computational Fluid Dynamics
- 10- The One-Equation Turbulence Transport Model
- 11- The Large Eddy Simulation
- 12- Renormalization-Group Methods
- 13- Advection-diffusion

Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(11), pp.1221-1224.

-Beg, M. and Beg, S. (2013), "Scour Reduction around Bridge Piers: A Review", International Journal of Engineering Inventions, Volume 2, Issue 7. pp. 7-15.

-Moncada-M A.T., Aguirre-Pe J., Bolívar J.C. and Flores E.J. (2009), "Scour protection of circular bridge piers with collars and slots", J. Hydraulic Res, ASCE, 47(1): pp.119.

-Neill, C.R. (1973), "Guide to bridge hydraulics", Edited by C.R. Neill, published for Roads and Transportation Assn. of Canada by University of Toronto Press.

-Singh C.P., Setia B. and Verma D.V.S. (2001), "Collar-sleeve combination as a scour protection device around a circular pier", Proc. 29th IAHR Congress, Beijing, Theme D. 202r. Pr.

-Singh KK, Verma DVS and Tiwari NK, (1995), "Scour protection at circular bridge piers", 6th Internatinal Symposium on River Sedimentation. New Delhi, India.

-Tafarjnoruz, A., Gaudio, R., and Dey, S. (2010), "Flow-altering countermeasures against scour at bridge piers: a review", Journal of Hydraulic Research, 48(4): pp.441-452.

-Tafarjnoruz, A., Gaudio, R., and Calomino, F. (2012), "Evaluation of Flow-Altering Countermeasures against Bridge Pier Scour", J. Hydraul. Eng., 138(3), 297-305, doi: 10.1061/(ASCE)HY.19437900.0000512.

-Tanaka, S. and Yano, M., (1967), "Local Scour around a Circular Cylinder", Proc. 12th IAHR Congress, delft, The Netherlands, 3, pp.193-201.

-Thomas, Z., (1967), "An Interesting hydraulic effect occurring at local scour", Proc. 12th Congress, I.A.H.R., Ft. Collins, Colorado, Vol. 3, pp. 125-134.

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

-Zarrati, A.M., Nazariah, M. and Mashahir, M.B., (2006), "Reduction of local scour in the vicinity of bridge pier group using collars and riprap", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 132(2), pp. 154-162.

14-Suspended Sediment

15-Packed Sediment

6-مراجع

- آرم، ن. و قمشی، م. (1392)، "اثر شمعهای حفاظتی بر کاهش آبستنگی در پایه پل استوانه‌ای"، نشریه دانش آب و خاک، 23(3): صص.123-134.

-بلوچی، م.، (1386)، "بررسی اثر تغییر شکل طوق بر میزان و روند آبستنگی پایه‌های پل"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

-پارسا بصیر، ه. (1383)، "حفاظت پایه‌های پل در مقابل آبستنگی موضعی با استفاده توام از سنگ‌چین و طوق"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

-پیرمحمدی، ر. و حیدرپور، م.، (1385)، "مقایسه‌ی عملکرد طوق در گروه پایه‌های سری دوتایی و سه‌تایی استوانه‌ای شکل پل‌ها"، هفتمین کنگره‌ی بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، 20-18 اردیبهشت.

-مسجدی، ع و غلامزاده محمودی، م. (1390)، "بررسی آزمایشگاهی اثر طوقه در کنترل آبستنگی اطراف پایه پل استوانه‌ای در قوس 180 درجه رودخانه"، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال پانزدهم، شماره پنجاه و پنجم.

-Chabert, J. and Engeldinger, P. (1956), "Etude des affouillement autour des Piles des ponts (Study on Scour around bridge piers)", Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou, France.

-Chiew Y.M. (1995), "Mechanics of Riprap Failure at Bridge Piers", J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 9, pp. 635-643.

-Chiew, Y.M. (1992), "Scour Protection at Bridge Piers", J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 118(9), pp.1260-1269.

-Chiew Y.M. and Lim, F. H. "Failure Behavior of Riprap Layer at Bridge Piers under Live-Bed Conditions", J. Hydr. Engrg, ASCE, 2000, 126(1), pp.43-55.

-Ettema, R. (1980), "Scour at Bridge Piers", Report No. 216, School of Engrg., University of Auckland, Auckland, New Zealand.

-Melville, B.W. and Hadfield, A.C. (1999), "Use of sacrificial piles as pier scour countermeasures",

