

# بررسی تأثیر شکل پایه پل بر میزان آبشستگی پایه پل با استفاده از نرم افزار SSIIM

علی زرودی<sup>۱</sup>، کورس نکوفر<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی

۲- نویسنده مسئول) استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس ([nekoufar@iauc.ac.ir](mailto:nekoufar@iauc.ac.ir))

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵

## چکیده

مطالعات انجام شده روی سازه‌های هیدرولیکی به خصوص اطراف پایه‌های پل نشان می‌دهد که یکی از عوامل اصلی تخریب پل‌ها آشفته‌گی موضعی جریان است. برای اینکه بتوان طراحی اقتصادی و قابل اطمینان داشت، باید حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ها را به دست آورد. برآورد حداکثر عمق آبشستگی با هدف تعیین عمق لازم برای پایه‌های پل لازم است، زیرا در غیر این صورت ممکن است منجر به تخریب پل شود. در این پژوهش از نرم‌افزار SSIIM استفاده شده است که به صورت سه‌بعدی، معادلات جریان و رسوب را لحاظ می‌کند. در این نرم‌افزار، میدان جریان از معادلات ناویراستوکس و مدل آشفته‌گی K-ε به دست می‌آید و سپس، با استفاده از حل غیردائمی میدان رسوب و معادله پیوستگی، تغییرات تراز کف در اطراف پایه پل محاسبه می‌شود. نتایج حاصله در این پژوهش نشان می‌دهند، مدل عددی استفاده شده که یکی از مدل‌های سه‌بعدی در دسترس مهندسیین هست، در شبیه‌سازی جریان، محاسبه سطح آزاد و محاسبه تغییرات توپوگرافی بستر در رودخانه مقادیری قابل قبول پیش‌بینی می‌نماید و با این‌که در نواحی دارای جریان‌های چرخشی شدید، در بعضی نقاط خطای محاسبه سرعت زیاد می‌شود، ولی مدل قادر است توزیع سرعت و جریان‌های چرخشی را به خوبی مدل‌سازی نماید. از مدل‌های ارائه شده اثبات گردید که تحت شرایط یکسان، آبشستگی حول پایه‌ی مربعی و استوانه‌ای نسبت به پایه‌ی مستطیلی بیشتر هست.

کلید واژه: آبشستگی، شکل پایه، پایه‌ی پل، نرم‌افزار SSIIM

مقدمه

سازه‌ها در مسیر جریان یا برداشت مصالح بستر اتفاق افتد [۱].

آبشستگی موضعی در مجاورت پایه پل‌ها همواره به‌عنوان یک مشکل به‌ویژه در زمان وقوع سیلاب‌ها در رودخانه‌ها مطرح بوده است که اگر تمهیدات لازم برای پیشگیری از این پدیده و یا کاهش اثرات آن اندیشیده نشود، سازه پل با خطر انهدام مواجه خواهد بود.

برای طراحی اقتصادی و قابل اطمینان پایه‌های پل، برآورد حداکثر عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ها ضروری است. در حال حاضر پایه و اساس علمی برای طراحی سازه‌ای پایه‌ها به‌خوبی مشخص شده است، ولی در مقابل هیچ تئوری واحد یا مشخصی وجود ندارد که عمق آبشستگی را در پایه‌های پل با ضریب اطمینان بالا برآورد کند. در طراحی پل‌ها، پی آن‌ها باید به‌اندازه کافی عمیق باشد تا در مقابل آبشستگی مقاومت کند. از طرفی، این پی نبایستی آن‌قدر عمیق باشد که باعث بالا رفتن هزینه‌ها گردد. با به کار بردن روش‌هایی برای کاهش عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ها، می‌توان پی‌ها را در تراز بالاتری قرار داده و به این ترتیب هزینه‌ها را کاهش داد. با توجه به مطالب ذکر شده شناخت پدیده آبشستگی و مهم‌تر از آن به کار بردن روش‌هایی برای کاهش آبشستگی اطراف پایه‌های پل ضروری به نظر می‌رسد.

هدف از این تحقیق شناخت پدیده آبشستگی و مکانیزم تشکیل آن در اطراف پایه‌های پل، با استفاده از نرم‌افزار SSIIM و تأثیر شکل پایه در میزان کاهش یا افزایش پدیده آبشستگی می‌باشد.

یکی از مشکلات موجود در پل‌ها ایجاد پدیده آبشستگی در پایه پل‌ها است که اثرات نامطلوبی را در پی دارد. مسائل اصلی در این تحقیق عبارت‌اند از:

شناخت پدیده آبشستگی و دلایل و مکانیزم تشکیل آن در اطراف پایه‌های پل، تشریح انواع روش‌های جلوگیری و یا کم کردن میزان آبشستگی پایه پل و

برآورد عمق آبشستگی متعادل اطراف سازه‌های هیدرولیکی نظیر پایه‌های پل‌ها، مسئله بسیار مهمی است که به ما کمک می‌کند که در طراحی پایه‌های پل از نظر شکل هندسی، محل قرارگیری، عمق فرورفته در بستر به‌عنوان طول مهار لازم و... کم‌تر دچار خطا شویم و طرحی مطمئن و مقرون‌به‌صرفه داشته باشیم. محققین زیادی تلاش کردند تا بتوانند رابطه یا روشی ارائه دهند که بتواند حداکثر عمق حفره آبشستگی در اطراف پایه پل را محاسبه کند. اما به دلیل پیچیدگی مسئله و روابط حاکم بر آن و نیز کثرت پارامترهای تأثیرگذار بر روند پیشروی آبشستگی، تا به حال روشی که بتواند عمق متعادل آبشستگی را به‌طور دقیق محاسبه کند، ارائه نشده است. مهم‌ترین مسئله مهندسی آب در این مورد، ساخت پل‌ها بدون توجه کافی به تغییرات هیدرولیکی و ریخت‌شناسی رودخانه‌هاست. عوامل اصلی که ایمنی پل‌ها را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند، شامل کف کنی، رسوب‌گذاری، آبشستگی موضعی و احتمال حرکت جانبی آبراهه‌ها می‌باشند.

تعیین عمق فرسایش در محدوده پایه پل‌ها مستلزم آگاهی از نحوه جابه‌جایی مواد رسوبی بستر رودخانه‌ها است. پایه پل‌ها جریان عادی رودخانه را مختل می‌کند و تلاطم و اغتشاش حاصل از آن موجب فرسایش مواد رسوبی موجود در اطراف پایه 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.

آبشستگی در حقیقت جابه‌جایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه آن‌ها به مکان دیگری می‌باشد. آبشستگی ممکن است در نتیجه تغییرات طبیعی جریان در آبراهه یا در نتیجه فعالیت‌های انسان مانند ساخت

می‌باشد. این ضرایب توسط محققین فراوانی در مطالعات آزمایشگاهی و صحرایی، بر اساس شرایط مختلف جریان، پایه و مسیر بررسی شده است.

به فرسایش بستر و کناره آبراهه در اثر عبور جریان آب، فرسایش بستر در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی به علت شدت جریان زیاد و یا به فرسایش بستر در اثر به وجود آمدن جریان‌های متلاطم موضعی، آبشستگی گویند. عمق ناشی از فرسایش بستر نسبت به بستر اولیه را عمق آبشستگی می‌نامند.

در سال‌های اخیر آبشستگی موضعی پایه‌های پل در طول جریان‌های سیلابی بیش از سایر عوامل باعث تخریب پل‌ها شده است و به همین دلیل موضوع بسیاری از تحقیقات انجام‌شده در صدسال اخیر قرار گرفته است.

آبشستگی به فرم‌های مختلف، پایداری سازه‌های هیدرولیکی را مورد تهدید قرار می‌دهد و هر ساله پل‌های زیادی در سراسر دنیا در اثر عوامل هیدرولیکی و آبشستگی دچار آسیب‌های جدی و یا تخریب می‌گردند. به‌طور کلی انواع مختلف آبشستگی اطراف پایه‌ها را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم نمود: [۲]

الف) آبشستگی عمومی: چنانچه مقدار رسوب وارد شده به رودخانه و یا قسمتی از آن، از مقدار رسوب خارج شده کمتر باشد، فرسایش در کف یا دیواره رودخانه صورت می‌گیرد. در اثر این عمل، کف رودخانه به تدریج گود می‌شود که آن را کف کنی می‌گویند. کف کنی می‌تواند از عوامل مؤثر در کاهش تراز بستر در مجاورت پایه‌های پل طی مدت زمان طولانی محسوب گردد.

ب) آبشستگی در اثر تنگ‌شدگی مقطع: این نوع آبشستگی عمدتاً در مجاورت پایه‌های با فواصل نزدیک رخ می‌دهد. در این نوع آبشستگی در اثر تنگ‌شدگی مقطع جریان، سطح تراز و سرعت جریان آب افزایش

عملکرد آن‌ها، مدل‌سازی آبشستگی توسط نرم‌افزار SSIIM با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود و تحلیل آن.

تاکنون محققین زیادی مسئله آبشستگی پایه پل را مورد مطالعه قرار داده‌اند که به علت پیچیدگی و تعدد عوامل حاکم بر پدیده هنوز موفق به ارائه راه‌حل واحدی برای محاسبه عمق حفره آبشستگی و یا کاهش آن نشده‌اند. عواملی چون شکل آبراهه، خصوصیات جریان، شکل و زاویه استقرار پایه‌ها نسبت به جریان و خصوصیات رسوب همگی از عواملی هستند که در پیچیدگی مسئله آبشستگی پایه‌های پل دخالت می‌نمایند.

آبشستگی تابع پارامترهای متعدد کمی و کیفی است. با توجه به شرایط سازه‌ای، هیدرولیکی، هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و اقتصادی، عدم قطعیت‌های فراوانی در مطالعه آبشستگی پایه پل‌ها وجود دارد. طبق مطالعات انجام‌شده بر روی مسئله آبشستگی، این پدیده تابع متغیرهای ذیل می‌باشد.

$$y = f(d_0/b, Fr, \theta, \sigma_g, b/D_{50}, \text{shape})$$

که در آن  $y = d_s / b$  عمق نسبی آبشستگی است. این نسبت در واقع نسبت ماکزیمم عمق آبشستگی در اطراف پایه به عرض پایه پل عمود بر جهت جریان می‌باشد.  $d_0$  عمق جریان و  $Fr$  عدد بی‌بعد فرود و  $\theta$  زاویه بین جریان و محور پایه و  $\sigma_g$  انحراف معیار اندازه ذرات دانه‌ای و  $D_{50}$  اندازه متوسط رسوبات و  $\text{shape}$  نشان‌دهنده شکل پایه می‌باشد. به بیان دیگر معادله آبشستگی به صورت زیر است:

$$y = f(d_0/b, Fr, K_1, K_2, K_3, K_4)$$

که در آن ضرایب  $K_1, K_2, K_3, K_4$  به ترتیب نشان‌دهنده دانه‌بندی رسوبات، شکل پایه، چیدمان پایه‌ها نسبت به جهت جریان و اثرات نسبی عرض پایه و اندازه رسوبات

درنهایت با استفاده از این نرم‌افزار و داده‌های آزمایشگاهی موجود به مدل‌سازی و تحلیل پدیده آبشستگی و نیز عملکرد شکل پایه‌ها در میزان آن پرداخته خواهد شد و روی نتایج به‌دست‌آمده بحث خواهد شد.

### پیشینه تحقیق

محققان زیادی با توجه به داده‌های آزمایشگاهی یا صحرایی و مطالعات گسترده در خصوص مکانیزم آبشستگی، روابط زیادی برای تخمین و پیش‌بینی عمق آبشستگی ارائه دادند. هرکدام از این روابط تعدادی از پارامترهای مؤثر در آبشستگی را در بر گرفته‌اند. بعضی از محققان تأثیر یک یا دو پارامتر را در روابط خود در نظر گرفته‌اند و بعضی دیگر از پارامترهای بیشتری در روابط خود استفاده کردند.

مطالعات قبلی احمد در سال (۱۹۵۳)، درباره عمق آبشستگی موضعی در دیواره‌های آب‌شکن در غرب پاکستان بوده است. او در سال (۱۹۶۲)، کارهای لارسن را دوباره تجزیه و تحلیل کرد و آزمایش‌ها مهمی در غرب پاکستان بر روی جریان‌هایی با بستر ماسه انجام داد [۳].

دتیز (۱۹۷۲) یک سری آزمایش‌ها، با تغییر فاصله بین پایه‌ها و زاویه برخورد متفاوت برای دوپایه انجام داد [۷]. ملویل (۱۹۷۴) تحقیقاتی را بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در دانشگاه آکلند نیوزلند جهت تخمین آبشستگی پایه و کوله پل‌ها انجام داد. روش مورد استفاده بر اساس روابط تجربی بود که منجر به تعیین ضرایب برای مدل کردن حالت‌های مختلف جریان، قطر پایه، خصوصیات رسوب، نوع پایه، شکل و زاویه آن و خصوصیات کانال شد [۶].

حسونی‌زاده (۱۹۹۰) برخی از روابط محاسبه آبشستگی را مورد مقایسه قرار داده و روابط فروهلیچ (۱۹۸۸)، هانکو (۱۹۷۱)، شن (۱۹۶۹)، بروزر (۱۹۶۵) را دارای

یافته و در نتیجه پتانسیل حمل رسوبات از بستر رودخانه و در مجاورت پایه‌های پل افزایش می‌یابد.

(ج) آبشستگی موضعی: به‌طور کلی سازه‌های هیدرولیکی و پایه‌های پل‌ها باعث تغییر الگوی جریان و ایجاد جریان‌های آشفته در مجاورت سازه‌های مزبور و در نهایت ایجاد یک حفره در محل سازه‌ها می‌گردند. این نوع فرسایش در شرایط سیلابی شدت گرفته و یکی از عوامل اصلی در وقوع آسیب‌دیدگی سازه‌های هیدرولیکی و پل‌ها محسوب می‌گردد.

تاکنون در خصوص مکانیسم فرسایش در آبشستگی موضعی، مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است. به‌طور خلاصه، پس از برخورد جریان به پایه، فشار موضعی به وجود آمده و در نتیجه باعث جدا شدن خطوط جریان خواهد شد. این خطوط جریان گردابی با جریان منظم تداخل نموده و پس از تمرکز در جلوی پایه، باعث حفر گودالی در ناحیه بالادست پایه می‌شود. چرخش آب در داخل گودال جلوی پایه به دو طرف پایه نیز کشیده می‌شود و در مجموع، گردابی به نام گرداب نعل اسبی ایجاد می‌کند. در قسمت پایین دست پایه نیز نوع دیگری از جریان آشفته به وجود می‌آید که به‌صورت گرداب‌های کوچک از بستر به سمت سطح جریان حرکت می‌کنند. این نوع جریان گردابی تحت عنوان گرداب دنباله باعث انتقال رسوبات به پایین دست پایه می‌گردند اگرچه جریان‌های گردابی به فرم‌های دیگر نیز در اطراف پایه رخ می‌دهند، لکن جریان گردابی نعل اسبی گرداب‌های ناحیه دنباله مهم‌ترین عوامل ایجاد آبشستگی اطراف پایه‌های پل محسوب می‌گردند. [۴]

یکی از نرم‌افزارهای پرکاربرد در زمینه مدل‌سازی و تحلیل پدیده آبشستگی، نرم‌افزار SIIM است که به کمک این نرم‌افزار مدل‌سازی سه‌بعدی انجام می‌گیرد.

سطح مقطع دایره، مربع، مثلث، لوزی شکل انجام گرفت و سپس با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده رابطه‌ای برای تعیین تغییرات عمق آبستتگی برحسب زمان ارائه گردیده است [۷].

جهت کنترل و کاهش آبستتگی، تحقیقات و آزمایش‌هایی نیز صورت گرفته است که در ذیل به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود:

گارد و راجو (۱۹۷۷) الگویی را برای ایجاد پوشش سنگ‌فرش در اطراف پایه‌های مستطیلی با دماغه گرد معرفی کردند. در این الگو سطح پوشش سنگ‌چین قریب به شش برابر مقطع پایه پل مستطیلی است (نشریه شماره ۲۶۰، وزارت نیرو، ۱۳۸۱) [۸].

لاچلان (۱۹۹۹) به بررسی اثر صفحات مستغرق در کاهش آبستتگی پایه پل در حالت جریان آب زلال و بستر زنده پرداخت. او در آزمایش‌هایش با تغییر در پارامترهای مختلف (تعداد صفحات، فاصله صفحات در امتداد جریان، فاصله صفحات در جهت عمود بر جریان، غوطه‌وری، زاویه برخورد جریان نزدیک شونده با صفحات، طول و ارتفاعات صفحات) عملکرد صفحات مستغرق را بررسی کرد. لاچلان نشان داد در شرایط آب زلال با کاهش غوطه‌وری (فاصله سطح آب تا سطح بالای صفحات) عملکرد صفحات مستغرق افزایش می‌یابد.

درگاهی (۱۹۸۷) تحقیقاتی در زمینه مکانیزم آبستتگی اطراف پایه پل و چگونگی تأثیر طوق در عملکرد جریان‌ات رو به پایین و در نهایت کاهش آبستتگی پایه پل انجام داد. درگاهی از دو طوق دایره‌ای و تخم‌مرغی استفاده کرد. درگاهی کاهش سرعت آبستتگی را در حالت طوق‌دار مشاهده کرد و گزارش کرد که شکل طوق و موقعیت آن نمی‌تواند تغییری در مکانیزم آبستتگی داشته باشند. همچنین وی به‌کارگیری طوق در بالای بستر را رد کرد و نتایج محققین قبلی را تأیید نمود [۱۰].

دقت خوبی برای تعیین عمق آبستتگی موضعی اطراف پایه‌های پل دانست [۵].

صمیمی (۱۳۸۵) با استفاده از حل معادلات میدان جریان و انتقال رسوب در اطراف پایه پل‌ها به محاسبه عمق آبستتگی موضعی با استفاده از روش اجزاء محدود پرداخت. در تحقیق صورت گرفته از معادله ناویراستوکس به‌عنوان معادله‌ای که میدان سرعت را مدل می‌کند استفاده شده است. در ابتدا معادله ناویراستوکس حل شده و میدان سرعت به دست می‌آید. سپس از سرعت‌های حاصل در صفحه افقی، به‌عنوان اطلاعات ورودی در حل معادله انتقال رسوب استفاده گشته است [۷].

الماسی (۱۳۷۸) با استفاده از مدل فیزیکی، آبستتگی پایه‌های مستطیلی را در حالت مختلف مورد بررسی قرار داد و نتایج به‌دست‌آمده را با نتایج حاصل از روابط تئوری مقایسه کرد. شکل پایه‌های مورد آزمایش وی به‌صورت مربع و مستطیل و با زوایای مختلف نسبت به سرعت غالب در کانال می‌باشد [۷].

نظریها (۱۳۸۰) تغییرات زمانی آبستتگی موضعی اطراف مدل فیزیکی پایه‌های استوانه‌ای با ابعاد مختلف تحت شرایط آب صاف و در طول زمان مورد بررسی قرار داد و نتایج حاصل را با فرمول‌های مختلف در این ارتباط مقایسه کرد [۹].

منتظر و همکاران (۱۳۸۱) با استفاده از شبکه‌ی عصبی به تخمین عمق آبستتگی اطراف پایه‌های پل پرداختند. پارامترهایی که در این تحقیق اثر آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است شامل دبی در واحد عرض جریان، عمق جریان، سرعت جریان، چگالی مصالح بستر و قطر پایه پل می‌باشند [۷].

محمدپور و رخشنده‌رو (۱۳۸۱) آبستتگی اطراف پایه‌های یکنواخت استوانه‌ای و غیر استوانه‌ای شکل در سازه‌های رودخانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌های آبستتگی در یک فلوم برای پایه‌های با

بحرانی (1)  $(\frac{t}{t_c} > 1)$  و کاهش قدرت گردابه‌های مخرب

شکل گرفته در اطراف پایه پل می‌گردد.

با افزایش بازشدگی اطراف پایه بر میزان تأثیرات مثبت شکاف در محافظت پایه در برابر آبشستگی موضعی افزوده شد. همچنین دریافتند که استفاده از تک پایه‌ای بزرگ‌تر به جای دو پایه مجزا عمود بر مسیر جریان، منجر به ایجاد آبشستگی‌های کمتری در اطراف پایه پل‌ها خواهد بود و در صورت استفاده از دو پایه عمود بر جریان نیز باید فاصله مناسب بین دو پایه در نظر گرفته شود تا حتی‌المقدور از اثرات مخرب این آرایش در ایجاد آبشستگی موضعی کاسته گردد [۱۳].

احمد شکیبائی‌نیا و همکاران با استفاده از نرم‌افزار SSIIM ۲,۰ به کاربرد مدل‌سازی عددی سه‌بعدی در شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده مهندسی رودخانه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل عددی SSIIM 2.0 در شبیه‌سازی جریان و محاسبه سطح آزاد و محاسبه تغییرات توپوگرافی بستر در رودخانه مقادیری قابل قبول پیش‌بینی می‌نماید و با اینکه در نواحی دارای جریان چرخشی شدید، در بعضی نقاط خطای محاسبه سرعت زیاد می‌شود ولی مدل قادر است توزیع سرعت و جریان چرخشی را به خوبی مدل‌سازی نماید.

در پیش‌بینی تغییرات بستر و عمق آبشستگی، مدل روند تغییرات بستر را هم در مدل آزمایشگاهی و هم در مقایسه با اندازه‌گیری‌های صحرائی به خوبی نشان می‌دهد ولی عمق حفره آبشستگی را کم‌تر و محل آن را جلوتر پیش‌بینی می‌نماید. درجایی که حرکت جانبی آبراهه وجود داشته باشد نتایج قابل قبول نیست ولی اگر رسوب‌گذاری در کناره‌ها رخ دهد مدل را به خوبی شبیه‌سازی می‌نماید [۱۴]. اسماعیلی و همکاران (۱۳۸۸)، عمق حفره آبشستگی در طول زمان هیدروگراف‌های مختلف در اطراف پایه استوانه‌ای را به کمک مدل عددی SSIIM شبیه‌سازی کردند. نتایج

زرانی و همکاران (۲۰۰۶) عملکرد طوق‌های مستقل و پیوسته با سنگ‌چین در کاهش آبشستگی موضعی در اطراف گروه پایه را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با دو پایه در یک خط، و ترکیب طوق‌های پیوسته و سنگ‌چین منجر به کاهش ۵۰٪ و ۶۰٪ عمق آبشستگی در جلو و عقب پایه می‌شود. ضمن اینکه آن‌ها دریافتند استفاده از طوق‌های مستقل کارایی بهتری نسبت به طوق‌های پیوسته دارد [۱۱].

امروزه کاربرد مدل‌های عددی در زمینه‌های مهندسی بسیار رایج گشته و با توجه به اهمیت آبشستگی و خسارات به بار آمده از این پدیده از انواع مدل‌های عددی برای محاسبه آبشستگی استفاده می‌شود که در زیر مواردی از مدل‌های استفاده شده را به طور مختصر آورده شده است.

اصغر عزیزیان و همکاران (۱۳۸۹) به ارزیابی آبشستگی پایه پل با استفاده از مدل عددی HEC - RAS4.0 و نتایج آزمایشگاهی پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها بیانگر توانایی بالای HEC - RAS4.0 مدل در برآورد صحیح مقدار عمق آبشستگی دارد. اما نتیجه مدل آن‌ها حدود ۱۰٪ با نتیجه آزمایشگاه داشت که این اختلاف می‌تواند ناشی از خطاهای آزمایشگاهی اعم از خطاهای انسانی در قرائت اعماق آبشستگی یا خطاهای ناشی از ابزار اندازه‌گیری باشد [۱۲].

مجتبی نوری‌فر و همکاران (۱۳۸۹) از مدل‌سازی عددی جریان سه‌بعدی اطراف پایه پل‌ها به کمک نرم‌افزار فلونتت برای مطالعات تأثیرات استفاده از شکاف ایجاد شده در تک پایه پل‌ها و نیز دو پایه پل کنار هم و عمود بر راستای جریان بر روی آبشستگی موضعی اطراف پایه پل‌ها استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که تعبیه شکاف در تک پایه پل‌ها دایروی موجب کاهش میزان تنش‌های برشی کف کانال در اطراف پایه پل و نیز کوچک‌تر شدن ناحیه تنش‌های برشی

شرایط سیل به وقوع پیوسته و اندازه‌گیری‌های واقعی در اختیار قرار می‌دهند.

### معادلات حاکم بر میدان جریان

در این نرم‌افزار معادلات حاکم بر میدان جریان معادلات ناویر استوکس می‌باشند که جهت حل آن از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استفاده می‌شود. به علاوه کد عددی SSIIM قابلیت استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف را نیز دارد. به هر حال معادلات ناویر استوکس برای سیالات تراکم ناپذیر با چگالی ثابت در حالت برداری به فرم زیر می‌باشد [۱۷].

رابطه:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad 1$$

که در رابطه‌ی فوق ترم اول سمت چپ ترم گذار (تغییرات زمانی) و ترم بعدی ترم جابه‌جایی می‌باشد. اولین ترم سمت راست ترم فشار و بعدی ترم مربوط به تنش رینولدز است. جهت ارزیابی ترم اخیر به یک مدل آشفتگی نیاز می‌باشد. جهت انفصال (گسسته‌سازی) از روش حجم محدود با استفاده از قاعده توانی یا الگوریتم جهتمند مرتبه دوم استفاده می‌شود.

روش SIMPLE نیز به‌عنوان پیش فرضی جهت تصحیح فشار به کار می‌رود که البته نرم‌افزار قابلیت استفاده از الگوریتم SIMPLEC را نیز داراست. به‌طور خلاصه می‌توان معادلات حاکم بر میدان جریان در حالت آشفته را معادله پیوستگی و معادله مومنتوم دانست. اگر فرض شود که جریان دائمی است ( $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ) و نوسانات جرم مخصوص صفر است ( $\rho' = 0$ ) معادلات مومنتوم و پیوستگی به ترتیب به‌صورت صفحه بعد قابل بیان هستند:

رابطه

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) \quad 2$$

آن 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 [۱۵].

طیب زاده و همکاران (۱۳۸۴) جهت اندازه‌گیری عمق آبستتگی متعادل اطراف پایه‌های پل با مقاطع دایره‌ای از مدل عددی SSIIM استفاده نمودند. نتایج مطالعات آن‌ها بیانگر دقت بسیار بالای مدل عددی SSIIM در محاسبه عمق آبستتگی در شرایط جریان دائمی بود. عمق آبستتگی متعادل در زمان نسبتاً طولانی حاصل می‌شود و این در حال است که ممکن است دبی پیک جریان به اندازه‌هایی تداوم نداشته باشد که عمق آبستتگی متعادل را ایجاد کند. بنابراین عمق آبستتگی متعادل ممکن است بزرگ‌تر از مقداری باشد که در طول زمان تداوم کوتاه‌تر ایجاد می‌گردد [۱۶].

در این زمینه از مطالعات و کارهای سازمان نقشه‌برداری جغرافیای آمریکا (USGS) که در همکاری با وزارت آذراه‌های فدرال آمریکا (FHWA) از سال ۱۹۹۴ به‌ویژه در ایالت آلاسکا انجام شده استفاده گردیده است. سازمان USGS مطالعات ارزنده‌ای را در ایالت آلاسکا با همکاری دپارتمان حمل‌ونقل و خدمات عمومی آلاسکا (ADOT & PF) راجع به آبستتگی در پایه پل‌ها انجام داد. آن‌ها پتانسیل آبستتگی را در سایت‌های مستعد جهت آبستتگی در فازهای مختلف بررسی کردند که از نتایج مطالعات در این فصل استفاده زیادی شده است. به‌علاوه این سازمان در جهت دسترس قرار دادن اطلاعات در شرایط واقعی و به‌روز اقدام به نصب دستگاه‌های نشان‌دهنده آبستتگی در بعضی از پل‌ها نموده که پس از وقوع سیلاب تغییرات پروفیل عرضی بستر را در محل پل‌ها نشان می‌دهند. این دستگاه‌ها معیار خوبی جهت بررسی میزان تطابق نتایج مدل در

۳

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0$$

$U$  مؤلفه سرعت،  $\rho$  چگالی سیال و  $P$  فشار کل می-باشد. ترم  $\rho u_i u_j$  همان ترم تنش رینولدز است. طبق روابط ۲ و ۳ می توان سه معادله مومنتوم و یک معادله پیوستگی نوشت که در آن ها مجموعاً ۱۰ مجهول (سرعت در سه جهت  $U, V, W$  و فشار  $p$  و شش مؤلفه تنش رینولدز) وجود دارد که این به این معنی می باشد که میدان معادلات حاکم بر جریان بسته نبوده و جهت بستن آن ها باید از معادلات آشفتگی نیز استفاده نمود.

برای تعیین سرعت ها نزدیک دیوارها از قوانین دیواره ارائه شده توسط اسکلیک تینگ (۱۹۶۹) استفاده شده است. پس از حل جریان، تنش برشی در بستر محاسبه شده و جهت مشخص کردن غلظت رسوب در نزدیک ترین سلول به بستر از روی معادله ون ریجن ۱۹۸۷ استفاده می شود. معادله انتقال پخش برای سلول های مجاور بستر حل نشده است و بنابراین تغییرات در بستر با حل معادله بقا، جرم برای رسوب به دست آمده است [۲۰].

#### مدل آشفتگی $k-\varepsilon$

مدل  $k-\varepsilon$  لزجت گردابه ای را به صورت زیر محاسبه می کند:

۴

$$v_T = C_\mu \frac{k}{\varepsilon}$$

$K$  انرژی جنبشی آشفتگی است و به صورت زیر تعریف می شود:

۵

$$K = \frac{1}{2} u_i u_i$$

معادله دیفرانسیلی مربوط به  $k$  به صورت زیر بیان می شود:

۶

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T}{\sigma_K} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + p_k - \varepsilon$$

در این رابطه فوق  $p_k$  طبق رابطه زیر تعیین می شود:

$$p_k = v_T \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad ۷$$

$\varepsilon$  بیانگر میزان اتلاف  $k$  بوده و به صورت زیر مشخص می شود:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_T}{\sigma_K} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad ۸$$

در معادلات فوق الذکر،  $C$  ضرایب ثابتی ها ثابتی هستند که توسط کاربر قابل تغییر نیست. همان طور که توضیح داده شد مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  مدل پیش فرضی آشفتگی در SSIM است.

به طور خلاصه می توان معادلات حاکم بر میدان جریان در حالت آشفته را معادله پیوستگی و معادله مومنتوم دانست.

اگر فرض شود که جریان دائمی است ( $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ ) و نوسانات جرم مخصوص صفر است ( $p' = 0$ ) معادلات مومنتوم و پیوستگی به صورت زیر قابل بیان هستند:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0$$

معادله پیوستگی

معادله مومنتوم (اندازه حرکت)

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( -\rho u_i u_j \right)$$

در روابط اخیر،  $U$  مؤلفه سرعت،  $p$  چگالی سیال و  $P$  فشار کل است. ترم  $\rho u_i u_j$  همان ترم تنش رینولدز می باشد. طبق معادلات می توان سه معادله مومنتوم و یک معادله پیوستگی نوشت که در آن ها مجموعاً ۱۰ مجهول (سرعت در سه جهت  $U, V, W$  و فشار  $p$  و شش مؤلفه تنش رینولدز) وجود دارد که بدان معناست که میدان معادلات حاکم بر جریان بسته نیست و تنش های رینولدز باید با استفاده از روش های ریاضی مدل سازی شوند. از این رو، برای بستن میدان معادلات حاکم از معادلات آشفتگی استفاده خواهد شد.



### محاسبه تغییرات تراز بستر

تغییرات تراز بستر با حل معادله پیوستگی رسوب برای حجم کنترل مجاور بستر با محاسبه اختلاف بین شار رسوبات ورودی و خروجی تعیین می‌شود. از تقسیم نتیجه بر جرم مخصوص مستغرق رسوبات، حجم رسوبات برداشت شده یا ته‌نشین شده در هر حجم کنترل محاسبه می‌شود و سپس این تغییر حجم به تغییرات تراز بستر شبکه عددی تبدیل می‌شود. در این روش پدیده‌های فرسایش و رسوب‌گذاری با استفاده از یک فرآیند مشابه شبیه‌سازی می‌شوند.

میدان محاسبه مجازی به دو لایه انتقال رسوب فعال در بالا و لایه تحتانی انتقال رسوب غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شود. لایه فعال در شرایط فرسایشی تأمین‌کننده رسوبات برای میدان محاسبه واقعی و در شرایط ته‌نشینی، دریافت‌کننده رسوبات از میدان محاسبه واقعی است. ضخامت این لایه برابر مقدار رسوبات برداشت شده در یک گام زمانی است و همچنین در شرایطی که انتقال ذرات با اندازه‌های مختلف صورت گیرد، مکانیسم منظم شدن ذرات در لایه فعال رخ می‌دهد.

ارتفاع لایه غیرفعال بری تأمین رسوبات مورد نیاز لایه فعال عدد بزرگی فرض می‌شود. توزیع اندازه ذرات در دو لایه با توجه به پیوستگی رسوبات برای هراندازه محاسبه می‌شود. در این مدل برای محاسبه تغییر تراز بستر شار بار معلق در سلول‌های مجاور بستر متحرک در نظر گرفته می‌شود، روند محاسبات در این روش به این ترتیب است که ابتدا با حل معادله انتقال - پخش غلظت رسوب، غلظت رسوب در کل میدان حل به دست آمده، سپس شارهای غلظت رسوب در سلول‌های مجاور مرز متحرک محاسبه شده و با استفاده از این مقادیر میزان جابه‌جایی هر سلول مرزی به دست می‌آید.

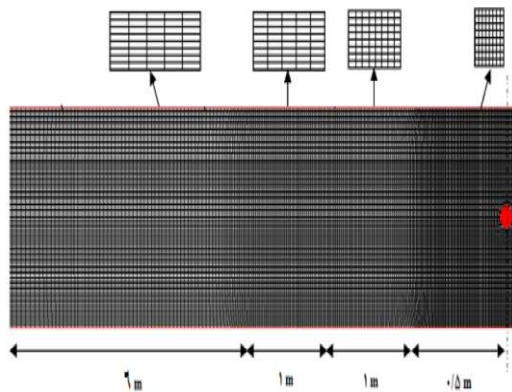
### حل عددی

جهت تحلیل جریانات هیدرولیکی سه روش وجود دارد که عبارت‌اند از روش تحلیلی، روش تجربی یا آزمایشگاهی و یا ترکیبی از این دو روش می‌باشد. از آنجایی که این جریان‌ها عموماً دارای ماهیت تصادفی بوده و به‌صورت سه بعدی و متغیر با بعد زمان می‌باشند بررسی آن‌ها به روش تحلیلی دشوار است. از سوی دیگر روش‌های تجربی نیز بر اساس نتایج آزمایشگاهی حاصل شده‌اند که عموماً به دلیل پرهزینه بودن آن‌ها از یک‌طرف و صادق بودن نتایج برای شرایط خاص دارای محدودیت بوده و قابل استفاده برای حالت کلی جریان نمی‌باشند. لذا با توجه به موارد ذکر شده ارائه روش‌های عملی و کاربردی جهت تحلیل این جریانات امری ضروری است و به همین دلیل از مدل‌سازی ریاضی استفاده می‌شود.

معادلات سه بعدی حاکم بر میدان جریان و رسوبات با استفاده از روش حجم محدود حل می‌شوند. روند کلی حل عددی به این صورت است که اطلاعات پیوسته که از حل دقیق معادلات حاکم به دست می‌آیند با مقادیر منفصل تعویض می‌گردند و به این ترتیب توزیع پارامترهای دخیل در معادله دیفرانسیل در میدان جریان به‌صورت منفصل به دست می‌آیند.

از میان روش‌های متعدد گسسته سازی معادلات دیفرانسیل، در مدل عددی روش حجم محدود مورد استفاده قرار گرفته است که به علت مستتر بودن خاصیت بقای جرم در آن، در حل میدان جریان سیال نسبت به سایر روش‌های انفصال برتری دارد. با توجه به آنکه هر حجم کنترل یک گره را احاطه می‌کند، مجهول منفصل در این گره نشان دهنده مقدار متوسط داخل حجم کنترل است.

از آنجا که معادلات دیفرانسیل جزئی قواعد بقاء را در یک مقیاس میکروسکوپی نشان می‌دهد، ایده اصلی روش حجم محدود آن است که انفصال نباید سعی در تقریب عددی معادلات انتقال جزئی در نقاط



شکل ۱- ساختار مش به کاررفته در شبیه‌سازی عددی و نمایش شماتیک ریز شدن سلول‌ها با نزدیک شدن به پایه

تعداد مقاطع استفاده شده در پلان در جهت طولی و با توجه به طول در نظر گرفته شده فلوم ۹۴۰ و در جهت عرضی ۱۲۰ عدد بود.

باتوجه به اینکه در جهت قائم توزیع خطوط شبکه در ۰، ۵٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪، ۵۰٪، ۷۰٪، ۹۰٪ و ۱۰۰٪ عمق جریان بوده است، تعداد کل سلول‌ها در شبکه سه‌بعدی مدل ۹۰۲۴۰۰ عدد بوده است. باتوجه به حساس بودن تغییرات سرعت در کف فلوم توزیع خطوط شبکه در نزدیکی بستر فشرده‌تر در نظر گرفته شده است.

پس از ساختن شبکه با اعمال شرایط مرزی بین دبی و تراز آب پایین‌دست مدل عددی اجرا شده و حداکثر عمق آبشستگی شده توسط مدل عددی در زمان‌های متناظر با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی ثبت گردید و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

از آنجاکه محاسبات میدان جریان و رسوب در سه بعد و به‌صورت وابسته به زمان صورت می‌گیرد، شبیه‌سازی عددی توسعه حفره آبشستگی باتوجه به گام زمانی که مدل کالیبره می‌گردد ممکن است چندین روز زمان ببرد.

از آنجاکه هدف، شبیه‌سازی عدد آبشستگی حول پایه استوانه می‌باشد، دبی و تراز آب پایین‌دست فلوم

منفصل داشته باشد، بلکه قواعد بقاء روی حجم کنترل انتگرال‌گیری شده و قضیه دیورژانس گاوس به کار گرفته می‌شود. نتیجه آن معادله‌ای است شامل شارهای انتقال و پخش از وجوه حجم کنترل، چشمه و چاه‌های انتگرال گرفته شده روی حجم و یک ترم غیردائمی.

در روش حجم محدود ابتدا دامنه موردنظر به تعدادی حجم کنترل غیر هم‌پوشان تقسیم‌بندی شده به‌طوری‌که هر حجم حول یک گره از میدان قرار می‌گیرد و آنگاه از معادله دیفرانسیل روی حجم کنترل انتگرال‌گیری می‌شود و معادلات به فرم عددی منفصل می‌شوند.

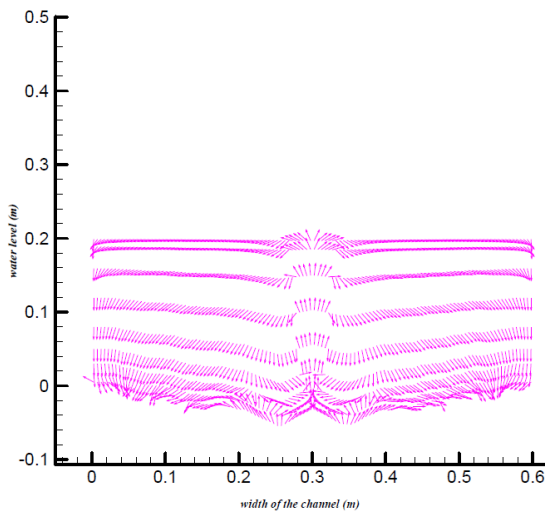
### کالیبراسیون مدل عددی

اولین مرحله قبل از اجرای مدل عددی تقسیم‌بندی ناحیه مورد نظر به سلول‌هایی است که معادلات دیفرانسیلی حاکم بر میدان جریان و رسوب باید برای آن‌ها حل گردند. این فرایند مش‌بندی (شبکه‌بندی) نامیده می‌شود. [۱۸]

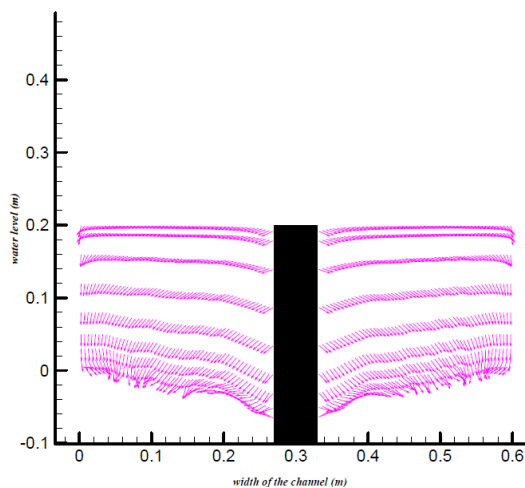
ساختن شبکه مناسب وقت‌گیرترین فرآیند آماده‌سازی اطلاعات ورودی برای مدل SSIIM می‌باشد که دقت محاسبات، همگرایی و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

جهت کاستن زمان و حجم محاسبات و درعین‌حال افزایش دقت آن، شبکه ساخته شده توسط یک برنامه جداگانه تهیه شده توسط مؤلفین به زبان QBASIC در سه مرحله و به‌تدریج با نزدیک شدن به پایه پل ریز شده است. به‌طوری‌که در فواصل دورتر از پایه اندازه سلول‌ها  $2/5\text{ cm} \times 0/5\text{ cm}$  و سپس با کمتر شدن فاصله  $2\text{ cm} \times 0/5\text{ cm}$  و  $1\text{ cm} \times 0/5\text{ cm}$  و نهایتاً در  $1\text{ m}$  میانی در اطراف پایه استوانه‌ای  $0/5\text{ cm} \times 0/5\text{ cm}$  تعیین شده است. شکل (۱) ریز شدن تدریجی شبکه را به‌صورت شماتیک و بدون مقیاس در نیمی از کانال نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های زیر می‌توان دریافت که عمق حفره آبستگي با نزديک شدن به پيشانی پایه استوانه‌ای به تدریج افزایش یافته است.



شکل ۲- تغییرات تراز بستر در کالیبراسیون عددی مدل ۴



شکل ۳- تغییرات تراز بستر حول پایه‌ی استوانه‌ای در کالیبراسیون عددی مدل ۴

به‌عنوان شرایط مرزی به مدل عددی داده شده، سپس مدل عددی با گام‌های زمانی ۴ و با تخصیص ضریب زبری مناسب طبق مراحل مشروح ذیل کالیبره می‌گردد.

نتایج به دست آمده از کالیبراسیون عددی در مدل‌های مختلف با گام‌های زمانی ۴ و ضرایب زبری متفاوت در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج به دست آمده از کالیبراسیون عددی مدل‌های مختلف

مدل	ضریب زبری (متر)	حداقل تراز بستر، آبستگي (میلی‌متر)
۱	۰/۰۰۸	۶۸
۲	۰/۰۰۹	۷۰/۸
۳	۰/۰۱	۷۳/۲
۴	۰/۰۱۲	۷۸/۱

نتایج به دست آمده از جدول فوق، نشان می‌دهد که در مدل شماره ۴ اختلاف بین مقادیر آبستگي آزمایشگاهی و مدل عددی به کمتر از ۱٪ می‌رسد که عملاً مقدار ناچیزی است و گویای آن است که بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی عددی سازگاری خوبی وجود دارد و مقادیر کم خطا در این مدل عددی سه بعدی و با در نظر گرفتن پارامتر زمان و حل معادلات بر مبنای آن، بیانگر توانمندی و دقت خوب این نرم‌افزار می‌باشد.

شکل‌های زیر تغییرات تراز بستر اطراف پایه استوانه‌ای را نشان می‌دهد.

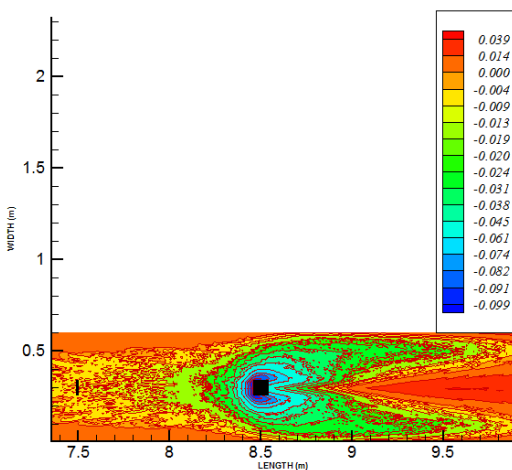
h (m m)	D (m m)	d <sub>50</sub> (m m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	u (m /s)	u/ u <sub>c</sub>	t <sub>e</sub> (m in)	y <sub>s</sub> (m m)
۲۰۰	۶۰	۱.۲	۰.۰۴	۰.۳۳	۰.۷	۱۴۰	۷۸
		۸		۳	۵		

در این تحقیق از داده‌های جدول فوق، به منظور شبیه‌سازی با استفاده از مدل عددی SSIIM استفاده شده است. طبق مشخصات مندرج در جدول، در این آزمایش تراز سطح آب ۲۰۰، قطر متوسط ذرات آبهستگی  $d_{50}=1.28mm$ ، دبی  $Q=0.04 m^3/s$ ، زمان آبهستگی ۱۴۰ و قطر پایه استوانه‌ای ۶۰ می‌باشد، که عمق آبهستگی ۷۸ است.

#### مدل‌سازی با اشکال مختلف

##### مدل‌سازی پایه استوانه‌ای

همان‌طور که در چند صفحه قبل اشاره شد، طبق مشخصات مندرج در جدول ۴-۱، این آزمایش با قطر پایه استوانه‌ای ۶۰ می‌باشد که عمق آبهستگی ۷۸، ۱ است. نتایج خروجی این مدل در اشکال فوق نشان داده شده است.



شکل ۴- تغییرات تراز بستر در مدل پایه‌ی استوانه-ای شکل

#### داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی

یک سری آزمایش‌ها طولانی با استفاده از پایه‌های استوانه‌ای در کانال با بستر یکنواخت تحت شرایط آب زلال در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه اوکایاما در ژاپن انجام شد. این آزمایش‌ها در کانالی به طول ۱۶۰ و به عرض ۶۰ و عمق ۴۰ صورت گرفت. آب از یک مخزن دارای ارتفاع توسط یک لوله به کانال منتقل می‌شد.

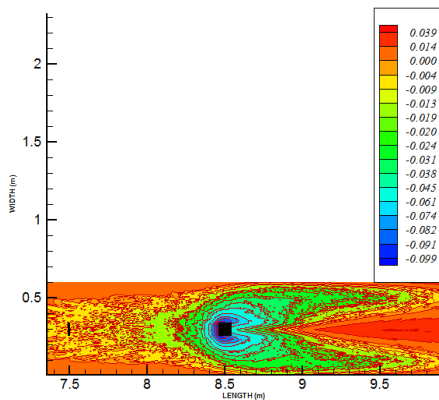
سرعت جریان در کانال با استفاده از یک دریچه (شیر آب) تنظیم می‌شد. عمق آب نیز با یک دریچه در پایین دست تنظیم می‌شد. هد روی سرریز لبه تیز و سطح آب با یک نقطه سنج با حساسیت ۰.۱، اندازه‌گیری شدند. یک منطقه با بستر متحرک به طول ۱۰۰ و عرض ۶۰ و عمق ۵۷ در فاصله ۱۰۰ پایین دست ابتدای کانال تعبیه شد و با رسوبات دارای قطر متوسط ذرات  $d_{50}=1.28mm$  و انحراف هندسی استاندارد  $\sigma_g=1.29$  پر شد.

یک پایه دایره‌ای عمودی در مرکز منطقه با بستر متحرک که قبل از شروع آزمایش ایجاد شده، قرار داده شده شیرآب بدون اینکه هیچ‌گونه آشفتگی در مصالح بستر ایجاد کند تا وقتی که دبی مورد نظر به وجود آید، به آرامی تنظیم شد. جریان یکنواخت تحت شرایط آب زلال برای دبی مورد نیاز به‌طور کامل ایجاد شد. کل فرآیند برای ایجاد کامل جریان یکنواخت تحت شرایط آب زلال در کمتر از سه دقیقه برای هر مورد تثبیت شد. آزمایش‌ها در یک مرحله وقتی که آبهستگی کمتر از ۱ در یک مساحت به وجود آمد یا در کل آبهستگی نداشت، متوقف می‌شدند. عمق‌های آبهستگی در زمان‌های مختلف توسط یک شاخص متصل ثبت شدند [۲۲].

#### جدول ۲- خلاصه‌ای از شرایط آزمایش

### مدل سازی پایه مربعی شکل

از آنجا که قطر پایه استوانه‌ای ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد، با فرض یک پایه مربع به ضلع برابر قطر پایه استوانه‌ای مدل - سازی شده که عمق آبستگي حول پایه پل ۹۶,۲ سانتی‌متر است و در ذیل خروجی‌های این مدل نشان داده خواهد شد.



شکل ۶- تغییرات تراز بستر حول پایه‌ی مستطیل شکل

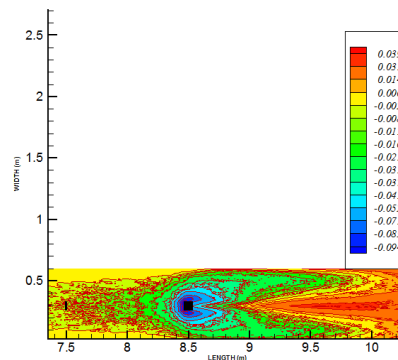
در نهایت نتایج به دست آمده از مدل‌های فوق در جدول زیر به طور خلاصه شرح داده می‌شود.

جدول ۳- نتایج مدل‌های مختلف

شکل پایه	عمق آبستگي (میلی‌متر)
استوانه‌ای	۷۸/۱
مربعی	۹۶/۲
مستطیل	۷۷

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصله در این پژوهش نشان می‌دهد، مدل عددی استفاده شده، که یکی از مدل‌های سه بعدی در دسترس مهندسين می‌باشد، در شبیه‌سازی جریان و محاسبه سطح آزاد و محاسبه تغییرات توپوگرافی بستر در رودخانه مقادیری قابل قبول پیش‌بینی می‌نماید و با این‌که در نواحی دارای جریان‌های چرخشی شدید، در بعضی نقاط خطای محاسبه سرعت زیاد می‌شود، ولی مدل قادر است توزیع سرعت و جریان‌های چرخشی را به خوبی مدل‌سازی نماید. از مدل‌های ارائه شده بر می‌آید که تحت شرایط یکسان، آبستگي حول پایه‌ی



شکل ۵- تغییرات تراز بستر در مدل پایه‌ی مربعی شکل

### مدل سازی پایه مستطیلی

در این مرحله یک پایه مستطیل با سطح مقطع یکسان با پایه مربع با اضلاع برابر ۱۳۰ سانتی‌متر \* ۳۰ سانتی‌متر مدل - سازی شده که عمق آبستگي حول پایه پل ۷۷,۰ سانتی‌متر به دست آمده است و نتایج به دست آمده در شکل‌های زیر نمایش داده می‌شود.

مربعی و استوانه‌ای نسبت به پایه‌ی مستطیلی بیشتر می‌باشد. اثبات گردید که نرم‌افزار SSIIM یک نرم‌افزار سه‌بعدی است و توانایی مدل کردن توسعه عمق حفره آبستنگی در حالت وابسته به زمان را دارد. به عبارت دیگر این نرم‌افزار می‌تواند گزینه مناسبی برای محاسبات رسوب و عمق آبستنگی اطراف پایه پل باشد.

## منابع

- ۱- مصباحی، م.، ۱۳۸۸، مقایسه روابط پیشنهاد شده برای حداکثر عمق آبستنگی پایه‌های پل با استفاده از داده‌های صحرائی، اولین همایش منطقه‌ای مهندسی عمران واحد خمینی شهر.
- ۲- عباس‌نیا، ا.، ۱۳۸۴، مدل کامپیوتری آبستنگی اطراف پایه پل با کاربرد روش‌های دقیق، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- ۳- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور فنی.، ۱۳۸۱، نشریه شماره ۲۶۰، راهنمای تعیین عمق فرسایش و روش‌های مقابله با آن در محدوده پایه‌های پل، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.
- ۴- وزارت نیرو، معاونت امور آب و آبفا، ۱۳۸۹، نشریه شماره ۳۱۸- الف، راهنمای روش‌های محاسبه آبستنگی موضعی، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.
- ۵- طهماسبی بیرگانی، ی.، ۱۳۸۵، مقایسه روش‌های محاسبه آبستنگی در پایه پل‌ها با بکارگیری داده‌های اندازه‌گیری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۶- خدانشناس، س.، و همکاران.، ۱۳۸۸، بررسی عملکرد طوق و شکاف در کاهش آبستنگی پایه پل، دانشگاه فردوسی مشهد ماه شرکت آب منطقه‌ای خراسان کمیته تحقیقات.
- ۷- صمیمی، ت.، و همکاران.، ۱۳۸۵، بررسی آزمایشگاهی اثر صفحات مستغرق بر آب شستگی پایه پل‌ها، همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی علوم آب.
- ۸- رهگذر، ر.، و فلاح، ف.، ۱۳۸۷، بررسی اثر عوامل مختلف در طرح هندسی پایه پل‌ها با تاکید بر اثر آبستنگی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- ۹- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت امور فنی، ۱۳۸۴، نشریه شماره ۳۰۲، دستورالعمل مطالعات هیدرولیکی و آبستنگی پایه پل، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.
- ۱۰- اسماعیلی، ت.، ۱۳۸۸، شبیه‌سازی عددی هیدرولیکی - هندسی آبستنگی در پایه پل‌های بتنی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران جنوب.
- ۱۱- سلیمانی، م.، ۱۳۹۱، امکان‌سنجی کاهش آبستنگی پایه‌ی پل به‌وسیله صفحات مستغرق با استفاده از نرم‌افزار SSIIM، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لار.
- ۱۲- شکیبائی‌نیا، ا.، و زراتی، ا.ر.، و مجدزاده طباطبایی، م.ر.، ۱۳۸۷، کاربرد مدل‌سازی عددی سه بعدی در شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده مهندسی رودخانه، نشریه دانشکده فنی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- ۱۳- ارونقی، ه.، و همکاران.، ۱۳۸۸، تعیین ابعاد مناسب طوق مستطیلی در کاهش آبستنگی پایه پل، مجله دانش آب و خاک، جلد ۱۹ شماره ۱.

- ۱۴- عزیزیان، ا. و همکاران، ۱۳۸۹، ارزیابی آبستتگی پایه پل‌ها با استفاده از مدل عددی HEC-RAS4.0 و نتایج آزمایشگاهی، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۱۵- صدقی اصل، م.، ۱۳۸۳، ارزیابی آبستتگی پایه پل‌ها (مطالعه موردی: پل بشار بالادست)، دومین کنفرانس ملی دانشجویی منابع آب و خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز.
- ۱۶- رستم‌آبادی، م.، و صالحی نیشابوری، ع.، ۱۳۸۷، شبیه‌سازی الگوی جریان حول یک صفحه مستغرق در کانال مستطیلی، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر.
- ۱۷- نوری‌فر، م.، و فغفور مغربی، م.، و حسن زاده، ی.، ۱۳۸۹، مقایسه عددی کاهش آبستتگی موضعی اطراف پایه پل شکاف‌دار و دو پایه پل مجزا، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد
- ۱۸- طیب‌زاده، م.، و همکاران، ۱۳۸۴، شبیه‌سازی عددی میزان آبستتگی اطراف پایه‌های پل با مقطع دایره‌ای، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شهید باهنر.