

کاربرد روش عددی و الگوی شبه دوبعدی SKM در برآورد تنش برشی اطراف پایه‌ی استوانه – ای همراه با صفحات مستغرق

ساجده حاجی عزیزی^{۱*}، داوود فرسادی زاده^۲، هادی ارونقی^۳، اکرم عباسپور^۴

چکیده

بررسی توزیع تنش برشی به‌جهت برآورد ابعاد حفره‌ی آبشستگی در اطراف پایه‌های پل از اهمیت زیادی برخوردار است. مروری بر پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که بررسی تنش برشی اطراف پایه‌های حفاظت شده به وسیله‌ی روش‌های مختلف مهار کردن آبشستگی، از توجه کافی پژوهشگران برخوردار نبوده است. در این پژوهش از یک الگو عددی سه‌بعدی برای مطالعه‌ی روند تغییرات تنش برشی پیرامون پایه‌ی پل همراه با صفحات مستغرق استفاده شده است. از طرفی، به دلیل دشواری محاسبه‌ی مقادیر تنش برشی در طبیعت، پژوهشگران روش‌هایی را برای محاسبه غیرمستقیم این عامل ارائه نموده‌اند، که یکی از این آنها، استفاده از الگوی شبه دوبعدی شینو و نایت (SKM) است. در این پژوهش الگوی توزیع تنش برشی اطراف پایه با وجود تعداد مختلفی از صفحات (۶ و ۴ و ۲)، با دو زاویه‌ی قرارگیری نسبت به جریان (۲۰ و ۳۰ درجه) و در شدت جریان ۰/۹۵ (شدت جریان بحرانی)، با کاربرد هر دو روش بررسی و مقایسه شده است. نتایج هر دو الگو نشان می‌دهند که قرارگیری صفحات تاثیر بسزایی در کاهش سرعت جریان حین عبور از صفحات داشته، در نتیجه کاهش تنش برشی بستر در اطراف پایه‌ی پل را به دنبال دارد. همچنین، بررسی تعداد و زاویه‌ی قرارگیری صفحات نشان داد که تعداد ۶ صفحه نسبت به ۲ و ۴ صفحه، و همچنین زاویه‌ی ۳۰ درجه نسبت به زاویه‌ی ۲۰ درجه کارایی بهتری دارد، به نحوی که تنش برشی را به میزان ۱۲- ۱۵ درصد کاهش می‌دهند.

واژه های کلیدی: پایه‌ی پل ، تنش برشی ، صفحات مستغرق ، الگوی شبه دوبعدی شینو و نایت (SKM) ، الگوی عددی سه‌بعدی.

^۱ دانشجوی دکتری سازه های آبی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تلفن : ۰۹۳۷۱۶۷۶۴۴۱ Email: sajedeh.azizi@yahoo.com

^۲ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۴ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

مقدمه

پایه‌های پل سازه‌هایی به شمار می‌روند که بنیادی-ترین نقش را در برقراری راه‌های ارتباطی دارا هستند. همه ساله پل‌های زیادی در سراسر جهان تخریب می‌شوند که عامل اصلی آنها آبشستگی است. آبشستگی موجب تضعیف و تخریب شالوده پایه می‌شود. روش‌های مختلفی برای مهار کردن این روند وجود دارد که یکی از ساده‌ترین، کاربردی‌ترین و قابل توجیه‌ترین از نظر اقتصادی، استفاده از صفحات مستغرق است. این صفحات در شکل‌ها و ابعاد مختلفی به کار برده شده و کارایی‌های متفاوتی دارند. از طرفی، در مطالعات هیدرولیکی و آب پویایی، غالباً از نمونه‌ی فیزیکی استفاده می‌شود که مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد است. با پیشرفت پویا سیالات محاسباتی، و با استفاده از شبیه‌سازی عددی جریان در این سازه، می‌توان از صرف هزینه و زمان زیاد جلوگیری نمود. ین و همکاران (۲۰۰۱) با استفاده از نرم افزار Flow-3D، و با ترکیب الگوی سه‌بعدی جریان با الگوی آبشستگی، توانستند تغییرات بستر و الگوی جریان را در اطراف پایه‌ی پل استوانه‌ای شبیه‌سازی کنند. آنها از الگوی LES برای شبیه‌سازی آشفتگی و تنش برشی بستر استفاده کرده و نتایج شبیه‌سازی را با نتایج تجربی یه مقایسه نموده و مطابقت مناسبی را گزارش دادند. آقایی و حکیم‌زاده (۲۰۱۰)، با استفاده از نرم افزار فلوئنت به شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان اطراف یک پایه‌ی استوانه‌ای به‌منظور بررسی جریان آشفتگی پیرامون آن، پرداختند. آنها برای حل معادلات آب پویایی از روش معادلات ناویراستوکس متوسط‌گیری شده رینولدزی (RANS) و برای حل معادلات آشفتگی از دو معادله Standard k-ε و LES استفاده کردند. معادلات حاکم به روش حجم محدود گسسته شدند، سپس نتایج الگوی عددی در زمینه‌ی سرعت، فشار و تنش برشی بستر با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج گویای این بودند که الگوی LES عملکرد بهتری را نسبت به الگوی Standard k-ε داشته است. بشارتی‌گیوی و حکیم‌زاده (۲۰۱۰) به بررسی عددی سه‌بعدی الگوی جریان و تنش برشی بستر اطراف پایه‌های مخروطی پرداختند. آنها در ابتدا میدان محاسباتی را با نرم افزار گمبیت شبکه‌بندی کرده، سپس با نرم افزار فلوئنت مورد تحلیل قرار دادند. سرانجام الگوی جریان و تنش برشی بستر اطراف پایه بررسی و مقایسه شد. نتایج حاصل از

الگوی عددی نشان دادند که شیب‌دار شدن پایه تاثیر به-سزایی در کاهش آشفتگی جریان گذرنده داشته و در نتیجه کاهش تنش برشی بستر در اطراف پایه را به‌دنبال دارد. حسن‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) اثر شکل‌های مختلف پایه‌ی پل بر الگوی جریان اطراف آن را با استفاده از نرم افزار فلوئنت بررسی کردند. آنها به‌جهت لحاظ نمودن اثر سطح آزاد از روش حجم سیال (VOF)، و به‌منظور وارد کردن آشفتگی به محاسبات از مدل k-ε استفاده نمودند. نتایج محاسبات گویای آن بودند که مقطع دوکی و بیضی شکل بهترین نوع مقطع در کاهش تنش برشی و در نتیجه کاهش آبشستگی اطراف پایه است. محمد (۲۰۱۳) به شبیه‌سازی سه‌بعدی الگوی جریان و آبشستگی موضعی در اطراف دو پایه‌ی متوالی، یکی به صورت مستغرق و دیگری غیرمستغرق، پرداخت. او از روش حجم محدود برای حل معادلات ناویراستوکس، و از مدل آشفتگی k-ε برای حل معادله‌ی تنش رینولدزی استفاده کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی موجود مقایسه شدند و تطابق خوبی بین آنها گزارش شد.

همان‌طور که ذکر شد، نخستین تجربیات شبیه-سازی‌های عددی برای پایه‌ی منفرد، گروه پایه‌ها، پایه کج، پایه با مقاطع مختلف و غیره صورت گرفته است. در این میان بررسی تنش برشی پیرامون پایه‌های حفاظت شده، از نظرها دور مانده و کمتر به آن توجه شده است. از موارد معدود این پژوهش‌ها می‌توان به مطالعات ارونقی (۲۰۱۰) اشاره نمود که به شبیه‌سازی الگوی جریان اطراف پایه‌ی پل با طوق مستطیلی پرداخته است. با توجه به اینکه یکی از عامل‌های کلیدی بسیار مهم در مبحث آبشستگی تنش برشی است، از اهداف این تحقیق بررسی عددی این متغیر در اطراف پایه پل همراه با صفحات مستغرق برای حفاظت در مقابل آبشستگی است.

با توجه به اهمیت تنش برشی در مسائل هیدرولیک جریان و رسوب رودخانه‌ها، و وابستگی آن به متغیرهایی مانند شکل مقطع عرضی، شرایط هیدرولیکی به‌خصوص نیم‌رخ لگاریتمی، توزیع سرعت طولی و عرضی، زبری در مرزها، جریان ثانویه و نرخ انتقال رسوب، اندازه‌گیری مستقیم تنش برشی در عرض رودخانه‌ها نیاز به دستگاه-های پیشرفته و دقتی زیاد دارد. از این‌رو پژوهشگران روش‌های غیرمستقیم زیادی را برای تعیین مقدار تقریبی تنش برشی در کف و دیواره‌های رودخانه ارائه داده‌اند. در

عرضی)، تنش برشی را در عرض یک رودخانه پیمان رود مطالعه کردند. جیو و جولین (۲۰۰۵) روشی را برای تعیین تنش برشی متوسط وارد بر بستر و دیواره نهرهای مستطیلی با سطح صاف ارائه کردند. کین و همکاران (۲۰۰۹) الگوی ریاضی ساده‌ای را برای محاسبه توزیع تنش برشی در عرض یک نهر با مقطع مرکب در حالت زبری زیاد در دشت‌های سیلابی ارائه نمودند.

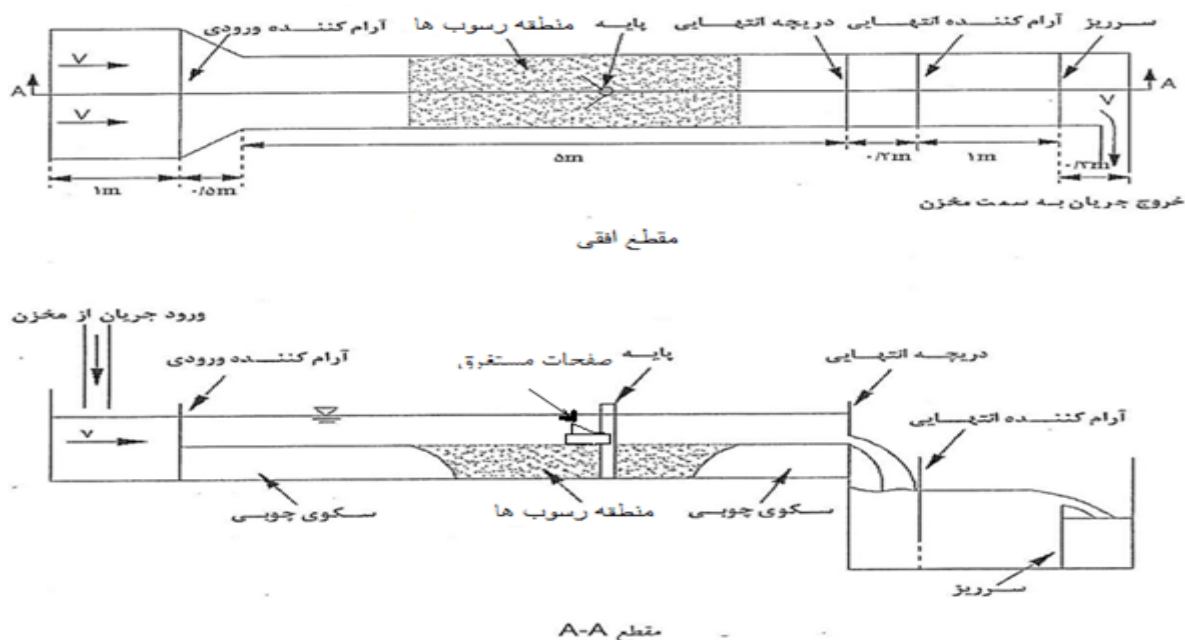
محققان دیگر هم نشان داده‌اند که الگوی شینو و نایت (SKM)، به دلیل در نظر گرفتن اثر جریان‌های ثانویه، و همچنین انتقال اندازه‌ی حرکت بین شبکه‌ها در عرض رودخانه، الگوی خوبی بوده و دارای دقت عمل قابل قبولی در تخمین تنش برشی است.

مواد و روش‌ها

مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی (نهر، پایه و صفحات مستغرق)

مشخصات فیزیکی این پژوهش مطابق با مشخصات طرح آزمایشی شجاعی (۲۰۱۰) است. محدوده‌ی هندسی طرح وی، شامل نهری با مقطع مستطیلی به عرض ۸۰ سانتی‌متر، طول ۸ متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر است که در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز موجود است (شکل ۱).

این روش‌ها، تنش برشی بر اساس متغیرهای اصلی هندسی و هیدرولیک جریان شامل عمق جریان، سرعت طولی، شیب طولی و ضریب زبری محاسبه می‌شود. نایت و همکاران (۱۹۸۴) روشی تجربی را برای محاسبه‌ی تنش برشی متوسط در بستر و دیواره‌ی نهرهای مستقیم مستطیلی ارائه نمودند. شینو و نایت (۱۹۸۸) الگوی تحلیلی دوبعدی را بر اساس معادله‌ی ناوراستوکس برای توزیع عرضی سرعت و تنش برشی در مقاطع ساده و مرکب ارائه کردند. سپس در سال ۱۹۹۱ با اصلاح این الگو، اثر جریان‌های ثانویه نیز در نظر گرفته شد. خدانشناس و پاکویر (۱۹۹۹) رابطه‌ی هندسی را برای پیش‌بینی توزیع تنش برشی در عرض نهرهایی با مقطع عرضی نامنظم به نام عمودهای به هم پیوسته ارائه نمودند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهند که به غیر از گوشه‌های نهر و محل اتصال نهر اصلی با دشت سیلابی، این روش تنش برشی را به خوبی پیش‌بینی می‌کند. یانگ و لیم (۲۰۰۲) یک روش تحلیلی را برای محاسبه‌ی توزیع تنش برشی در نهرهای منشوری با زبری غیریکنواخت ارائه کردند. این روش بر اساس انتقال کارمایه مازاد به کوتاه ترین فاصله نسبی به سمت دیواره در جریان دائمی، یکنواخت و آشفته توسعه یافته پایه‌ریزی شده است. بابائیان کویایی و همکاران (۲۰۰۲) با اندازه‌گیری شدت تلاطم جریان (نوسان‌های سرعت در جهت‌های طولی و



شکل ۱- مقطع افقی و مقطع طولی نهر آزمایشگاهی

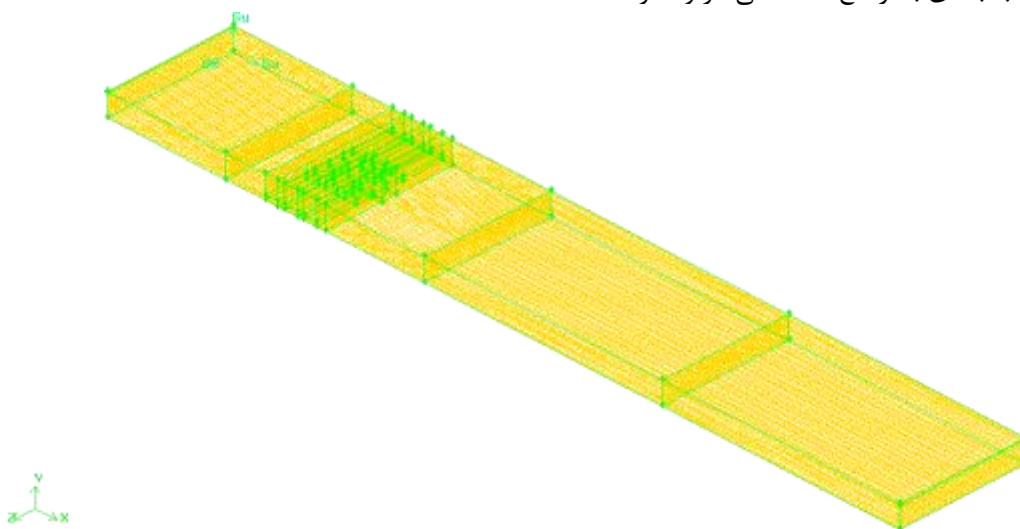
سانتی‌متر در فاصله‌ی ۲ متری از ابتدای این نهر پایه‌دار و صفحات مستغرق نیز مطابق با اندازه‌های مذکور با دو زاویه‌ی ۳۰ و ۲۰ درجه نسبت به جریان، در سه ردیف دوتایی در جلو پایه تعبیه شده است. به دلیل پیچیدگی حالت قرارگیری صفحات نسبت به پایه‌ی پل، و به منظور ایجاد یک شبکه‌ی منظم و قابل قبول جهت حل معادله‌ی جریان، حجم کل سازه در حالت پایه به همراه دو صفحه‌ی مستغرق، به ۱۲ قطعه کوچک‌تر تقسیم شد. در حالت پایه با چهار صفحه مستغرق شمار این قطعه‌ها به ۱۹ و نهایتاً در حالت پایه به همراه شش صفحه مستغرق، تعداد این قطعه‌ها به ۲۹ عدد رسید، که این افزایش باعث پیچیدگی هر چه بیشتر نوع و ترکیب شبکه‌ها می‌شد (شکل ۲). برای شبکه‌بندی الگو در بیشتر حجم‌ها از شبکه شش وجهی (مربعی) که نسبتاً مطلوب‌تر است، استفاده شد. اما در محل استقرار صفحات مستغرق، به دلیل ضخامت کم این صفحات (۱ میلی‌متر) از شبکه‌های چهار وجهی (مثلثی) استفاده شد. به منظور ایجاد شبکه‌های منظم در منطقه‌ی پایه از الگوریتم Quad-Pave، و در سایر قسمت‌ها از الگوریتم Quad-Map استفاده گردید. شبکه‌بندی حجم‌ها نیز در منطقه پایه با الگوریتم Hex-Cooper، و در قسمت‌های دیگر با الگوریتم Hex-Map صورت پذیرفت (شکل ۳). در مرحله‌ی آخر نیز شرایط مرزی برای دیواره‌ها، پایه و صفحات مستغرق، Wall و برای صفحه‌ی ورودی و خروجی Velocity Inlet تعریف گردیدند.

پایه‌ی مورد استفاده در این نمونه‌ی آزمایشگاهی دارای قطری برابر با ۶ سانتی‌متر است. صفحات مستغرق به کار رفته در این تحقیق نیز، به ترتیب دارای ابعاد طولی، عرضی و ارتفاعی، ۹ سانتی‌متر، ۱ میلی‌متر و ۳ سانتی‌متر هستند. در تمامی آزمایش‌های ایشان، شدت جریان برابر با ۰/۹، عمق جریان برابر با ۰/۱۴۷ متر و دبی برابر با ۰/۰۳ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

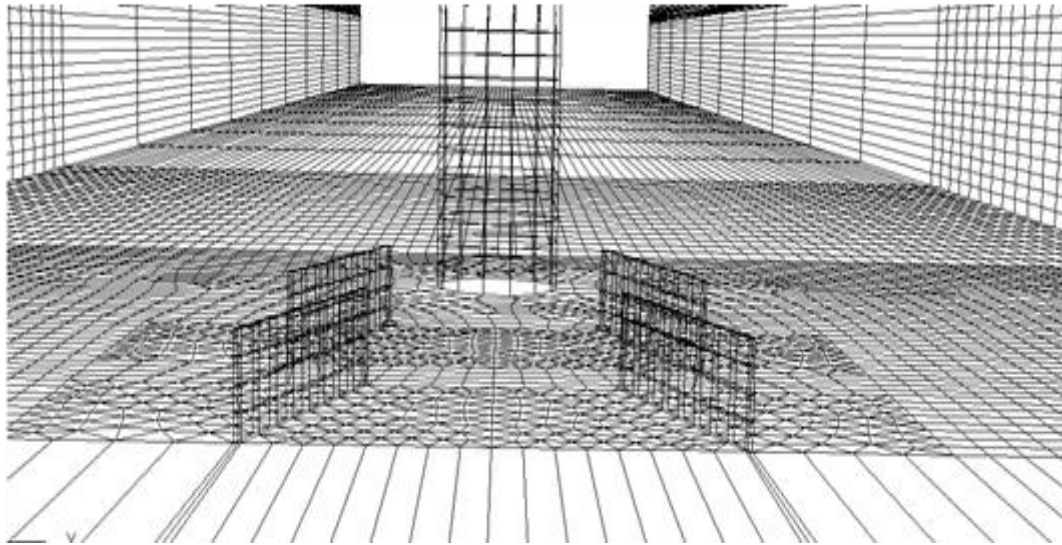
شبیه‌سازی عددی

در تحقیق حاضر از شبیه‌سازی سه‌بعدی استفاده گردیده است. شبیه‌سازی سه‌بعدی روشی برای نمایش بعدهای یک جسم است که در فضای مجازی، یعنی صفحه نمایش‌ها، به تصویر کشیده می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها به وسیله یک نرم افزار طراحی با قابلیت‌های رسم خط و شکل، تحت محورهای مختصات X, Y, Z ، یعنی سه بعد ریاضی، با تعریف مکان هندسی اجزا و شکل‌های پایه هندسی و خط‌ها رسم می‌شوند. بدین ترتیب یک حجم دقیق از یک جسم واقعی یا مجازی در رایانه به شکل سه-بعدی خلق می‌گردد. الگوی ساخته شده می‌تواند به روش‌های گوناگون و با تعداد اجزاء متفاوت شبیه‌سازی شده باشد.

در مطالعه حاضر برای کاهش حجم محاسبه‌ها، همچنین عدم نیاز به شبیه‌سازی کل نهر پایه‌دار، مقطعی به طول ۵ متر، عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۶ سانتی‌متر به عنوان طرح مسئله تعریف شده است. سپس پایه‌ی استوانه‌ای شکل، با ابعادی به ارتفاع ۱۶ سانتی‌متر و قطر ۶



شکل ۲- مدل شبکه‌ای سازه در محیط Gambit



شکل ۳- شبکه‌بندی منطقه‌ی الگوی پایه‌ی پل با چهار صفحه‌ی مستغرق

جدول ۱- بررسی تأثیر تعداد شبکه‌های مختلف.

تعداد شبکه	RMSE (mm)
۲۳۰۰۰	۹/۱۸
۴۴۰۰۰	۶/۵۱
۶۰۰۰۰	۱/۶۷
۷۱۰۰۰	۲/۷۱

رابطه‌ای که در نرم افزار فلوئنت به منظور محاسبه‌ی تنش برشی بستر مورد استفاده قرار گرفته است، به صورت زیر است:

$$\tau = \rho \varepsilon \frac{du}{dy} \quad [2]$$

که در آن، ε لزجت گرادابه‌ای است که از جریانی به جریان دیگر، یا در یک مسئله‌ی خاص از نقطه‌ای به نقطه دیگر، متفاوت است. به $\rho \varepsilon$ اصطلاحاً μ_t گفته می‌شود.

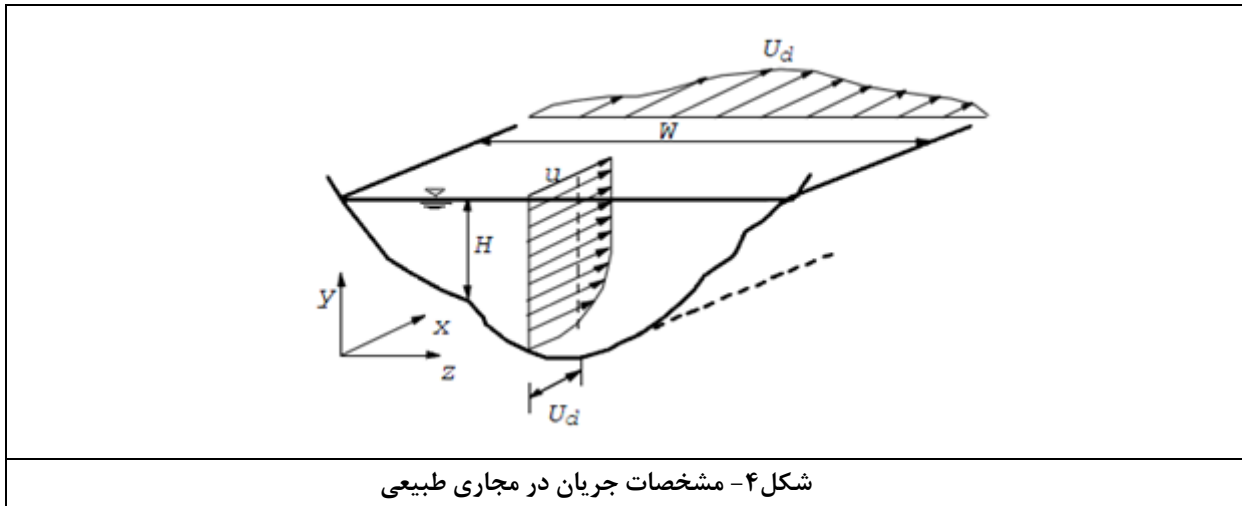
الگوی شینو و نایت (SKM)

شینو و نایت برای محاسبه‌ی توزیع عرضی سرعت و تنش برشی در نهرها و رودخانه‌ها، به کمک انتگرال‌گیری در عمق از معادله‌ی ناپیراستوکس، روش ساده و با دقت مناسبی را ارائه نمودند. در این روش جریان به صورت یکنواخت و ماندگار فرض می‌شود، اما اثر جریان‌های ثانویه و نیز انتقال اندازه‌ی حرکت بین شبکه‌ها در عرض رودخانه در نظر گرفته شده است (شکل ۴)

در الگوی عددی ورودی نهر تا ارتفاع ۰/۱۴۷ متر به عنوان مرز ورود آب با سرعت ۰/۲۵۵۱ متر بر ثانیه و از تراز ۰/۱۴۷ متر تا بالای نهر به عنوان مرز ورود هوا با سرعت جریان ورودی برابر با صفر تعریف گردید. برای صفحه‌ی خروجی نیز عینا همان شرایط مرز ورودی تنها با اعمال سرعت منفی برای مرز آب لحاظ گردیده، و در انتها برای فراخوانی شبکه به وسیله نرم افزار Fluent در قالب msh ذخیره شد.

یکی از مباحث مهم در شبیه‌سازی عددی، بحث استقلال الگو از شبکه است. به این منظور، تراکم شبکه‌ها در الگو تغییر داده شده و پس از بررسی میزان دقت شبکه‌های مختلف، شبکه‌ی بهینه (مناسب‌ترین شبکه) انتخاب می‌گردد. نتایج بررسی این متغیر در جدول ۱ ارائه گردیده اند. در این جدول میزان معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) مربوط به شبکه‌های مختلف در تعیین عمق جریان محاسبه و تعداد ۶۰۰۰۰ شبکه به- عنوان شبکه بهینه انتخاب گردیدند. لازم به ذکر است که جذر میانگین مربعات خطا از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود که در آن y_{pi} و y_{ni} به ترتیب عمق آب حاصل از نمونه‌ی آزمایشگاهی، و عمق آب حاصل از الگوی عددی می‌باشد.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{pi} - y_{ni})^2 \right]^{0.5} \quad [1]$$



شکل ۴- مشخصات جریان در مجاری طبیعی

معادله‌ی دیفرانسیل زیر به وسیله‌ی شینو و نایت

(۱۹۹۱) ارائه شده است:

$$\rho g H S - \rho \frac{f}{8} U_d^2 \sqrt{1 + 1/s^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \lambda H^2 \sqrt{f/8} U_d \frac{\partial U_d}{\partial y} \right) = \frac{\partial H(\rho U V)_d}{\partial y} \quad [۳]$$

$$\Gamma = \frac{\partial H(\rho U V)_d}{\partial y} = \beta \rho g S H \quad [۴]$$

که در آن، β : ضریب واسنجی جریان‌های ثانویه بوده و دارای مقادیر مشخصی برای نهرهای ساده (۰/۰۵) و نهرهای مرکب (۰/۱۵) برای مجرای اصلی و ۰/۲۵-برای دشت‌های سیلابی) است. جواب‌های تحلیلی زیر برای رابطه‌ی ۳ ارائه شده‌اند (شینو و نایت، ۱۹۹۱):

برای نواحی با عمق جریان ثابت:

$$U_d = \left[A_1 e^{\gamma y} + A_2 e^{-\gamma y} + \frac{8gSH(1-\beta)}{f} \right]^{1/2} \quad [۵]$$

برای نواحی با عمق جریان متغیر یا شیب جانبی متغیر:

$$U_d = [A_3 Y^{\alpha_1} + A_4 Y^{-\alpha_2} + \omega Y + \eta]^{1/2} \quad [۶]$$

که در آن،

$$\alpha_1 = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left[1 + \frac{s\sqrt{1+s^2}}{\lambda} \sqrt{8f} \right]^{1/2} \quad [۷]$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 + 1 \quad [۸]$$

که در آن، H : عمق جریان، f : ضریب اصطکاک دارسی-وایسباخ، U_d : سرعت متوسط در عمق، s : شیب جانبی نهر، λ : ضریب بدون بعد لزجت جریان متلاطم هستند. γ نیز موقعیتی از عرض نهر است که سرعت و تنش برشی در آن نقطه باید به دست آید. طبق مطالعات پژوهشگران مختلف (نایت و همکاران، ۱۹۸۹؛ آپریل و نایت، ۲۰۰۴) ضریب λ در نتایج محاسبه‌ها حساسیت زیادی نداشته و در نظر گرفتن یک مقدار ثابت در عرض نهر کفایت می‌کند. معمولاً مقدار این ضریب ۰/۰۷ فرض می‌شود. در معادله‌ی دیفرانسیل بالا، عبارت سمت راست بیانگر اثر جریان‌های ثانویه است که معمولاً تحت تأثیر نوسان‌های سرعت در جهت‌های مختلف قرار گرفته و ممکن است به میزان قابل ملاحظه‌ای مقادیر تنش برشی را تغییر دهد. در این عبارت، U و V به ترتیب سرعت متوسط جریان در جهت طولی و عرضی را نشان می‌دهد. با توجه به دشوار بودن اندازه‌گیری مستقیم سرعت متوسط در جهت عرضی، شینو و نایت (۱۹۹۱) با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مقاطع ساده و مرکب مستقیم، اثر جریان‌های ثانویه (Γ) را به صورت تابع ساده‌ای از تنش برشی متوسط وارده بر بستر کانال ارائه نمودند:

سازی پایه با صفحات مستغرق انجام گرفته است. در مطالعات ارونقی (۲۰۱۰) پایه ی پلی به قطر ۱۲ میلی متر در نهری به طول ۱۰ متر، عرض ۲۵ سانتی متر و ارتفاع ۵۰ سانتی متر بررسی شده و نیمرخ های سرعت برای آن استخراج گردیده بودند. به منظور صحت سنجی، شرایط نمونه آزمایشگاهی مذکور در نرم افزار طراحی گردید و با استفاده از انواع الگوهای آشفتگی، نیمرخ های سرعت برداشت شدند. با انتخاب بهترین الگو آشفتگی به لحاظ کم بودن میزان خطا، صحت سنجی الگو عددی پایان پذیرفته و این اطمینان حاصل شد که نرم افزار فلونت قابلیت شبیه سازی الگوی جریان اطراف پایه را دارا است. در مطالعات ارونقی (۲۰۱۰) نیمرخ های سرعت در دو فاصله ی ۳ و ۱۰ سانتی متری بالادست پایه پل برداشت شده بودند. در مدل عددی نیز برداشت مقادیر مورد بحث، دقیقاً در همان مقاطع صورت گرفت. همان گونه که در شکل های ۵ و ۶ مشاهده می شود، نیمرخ سرعت حاصل از الگوی عددی در تطابق خوبی با الگوی فیزیکی قرار دارد، به نحوی که خطای الگوی عددی در دو مقطع به فاصله ۳ و ۱۰ سانتی متری از مرکز پایه پل به ترتیب، ۲/۹۲ و ۲/۷۶ درصد محاسبه شد، که خطای نسبتاً ناچیزی است. علت بیشتر بودن خطا در مقطع ۳ سانتی متری را می توان به تلاطم بیشتر جریان در این مقطع نسبت داد.

$$\gamma = \left(\frac{2}{\lambda}\right)^{1/2} \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \frac{1}{8} \quad [9]$$

$$\eta = \frac{-\Gamma}{\frac{\sqrt{1+s^2}}{s} \rho \frac{f}{g}} \quad [10]$$

$$\omega = \frac{gS}{\frac{\sqrt{1+s^2}}{s} \frac{\lambda}{s} \frac{f}{s^2} \sqrt{\frac{f}{g}}} \quad [11]$$

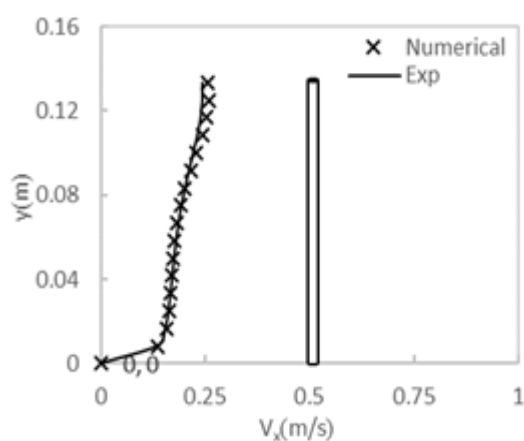
$$Y = H - \left(\frac{y-b}{s}\right) \quad [12]$$

که در آن، Y: عمق محلی آب است. به دلیل شرط عدم لغزش، سرعت جریان در ابتدا و انتهای مقطع عرضی (لبه آب) صفر بوده و به عنوان شرط مرزی معلوم وارد محاسبات خواهند شد. A: مجهولات معادله بوده و به کمک شرایط مرزی مناسب به دست می آیند. بعد از محاسبه توزیع سرعت در عرض نهر، تنش برشی مرزی در هر نقطه از رابطه ی ۱۳ قابل تعیین است:

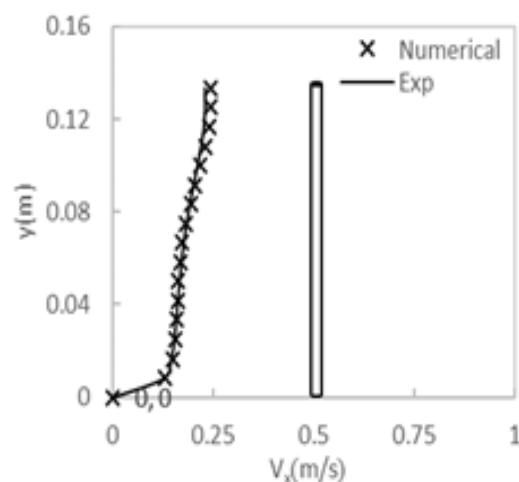
$$\tau_b = \rho f U_d^2 / 8 \quad [13]$$

صحت سنجی الگوی عددی

در این پژوهش، ابتدا الگو عددی حاضر با استفاده از نتایج ارونقی (۲۰۱۰) صحت سنجی گردیده، سپس شبیه-

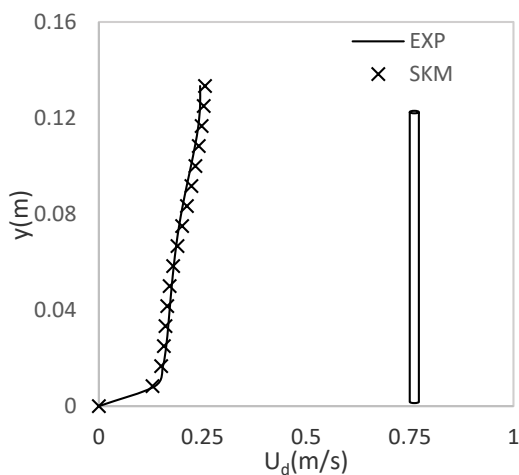


شکل ۶- نیمرخ توزیع سرعت در فاصله ی ۱۰ سانتی متری از پایه.



شکل ۵- نیمرخ توزیع سرعت در فاصله ی ۳ سانتی متری از پایه.

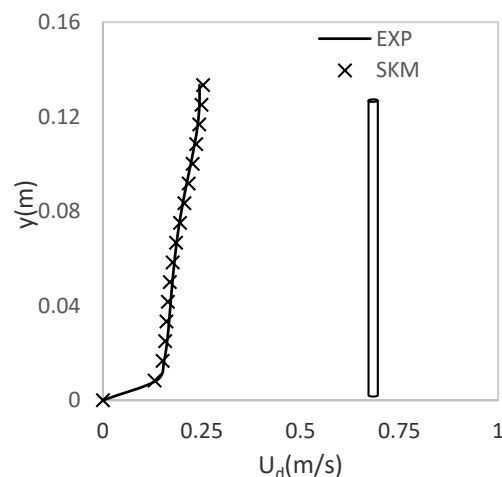
آزمایشگاهی قرار دارد. خطای این مدل در دو مقطع به فاصله‌ی ۳ و ۱۰ سانتی‌متری از مرکز پایه‌ی پل به ترتیب، ۲/۶۴ و ۲/۸۱ درصد محاسبه شد که خطای نسبتاً ناچیزی است. خطا در مقطع ۳ سانتی‌متری کمتر برآورد گردیده است. این موضوع با در نظر گرفتن وجود جریان‌های ثانویه قوی در نزدیکی پایه‌ی پل، و دقت الگو شینو و نایت در تخمین این متغیر، قابل توجیه است.



شکل ۸- نیمرخ توزیع سرعت در فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متری از پایه.

صحت‌سنجی الگوی شینو و نایت (SKM)

به منظور بررسی دقت الگو شبه دو بعدی شینو و نایت (SKM)، مقادیر متوسط سرعت عمقی محاسبه شده با استفاده از این الگو، با مقادیر آزمایشگاهی در مطالعات ارونقی (۲۰۱۰)، بررسی و مقایسه شدند. همان‌گونه که در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، نیمرخ سرعت حاصل از الگو شینو و نایت در همخوانی خوبی با نمونه‌ی



شکل ۷- نیمرخ توزیع سرعت در فاصله‌ی ۳ سانتی‌متری از پایه.

الگوی‌های پیشنهادی بهداد (۲۰۱۱)، نتایج قابل قبولی از تخمین تنش برشی و سرعت متوسط عمقی با کاربرد روش SKM به دست آمد. با توجه به شکل‌ها و جدول ۲ می‌توان بیان نمود که در هر دو روش عددی و SKM در حالت قرارگیری دو و شش صفحه‌ی مستغرق با هر دو زاویه ۲۰ و ۳۰ درجه، مقدار بیشینه تنش برشی نسبت به پایه منفرد کاهش یافته است. در مقایسه‌ی دو و شش صفحه نیز می‌توان اظهار داشت که تعداد شش صفحه در هر دو زاویه ۲۰ و ۳۰ درجه، نسبت به دو صفحه بهتر عمل نموده است، به نحوی که هم مقدار بیشینه تنش برشی حاصل از آنها کمتر بوده، و هم در فاصله‌ی دورتری نسبت به پایه اتفاق افتاده است. علت جابه‌جایی محل وقوع بیشینه تنش برشی را می‌توان به تغییر محل گردابه‌ها نسبت داد. به بیان دیگر، با اضافه شدن صفحات، گردابه‌ها به سمت پائین دست پایه پل منتقل شده و محل وقوع بیشترین تنش برشی نیز جابه‌جا می‌شود، زیرا همان‌طور که قبلاً گفته شد، عملکرد صفحات مستغرق بر مبنای ایجاد یک چرخش ثانویه در جهت عکس جریان ثانویه

نتایج و بحث

تحلیل تنش برشی

شکل‌های ۹ تا ۱۵ توزیع تنش برشی بستر را روی محور مرکزی نهر نشان می‌دهند. در مقایسه‌ی الگوی عددی فلونت با الگوی SKM می‌توان اظهار داشت که هر دو الگو تقریباً دارای عملکرد مشابهی در برآورد تنش برشی کف نهر هستند. مطابق با مطالعات بهداد (۲۰۱۱) نحوه مدل نمودن توزیع فاکتور اصطکاک اثر به‌سزایی در تخمین تنش برشی به روش SKM داشته و با در نظر گرفتن توزیعی خطی از فاکتور اصطکاک می‌توان از بروز جهش ناگهانی در پروفیل تنش برشی اجتناب نموده و نتایج مناسبی بدست آورد. پروفیل سرعت متوسط عمقی دارای حساسیت کمتری به توزیع فاکتور اصطکاک نسبت به پروفیل تنش برشی است و پارامتر جریان ثانویه که گویای الگوی جریان و شدت آشفتگی است، بیشتر در آن موثر است. در این تحقیق با در نظر گرفتن توزیع خطی از فاکتور اصطکاک و با تخمین پارامتر جریان ثانویه به کمک

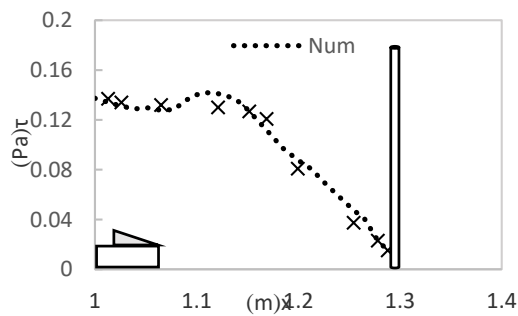
مقادیر تقریباً برابر هستند، و در این حالت صفحات بی تاثیر بوده‌اند، اما همچنان تعداد دو صفحه عملکرد بهتری را داشته است. در بازه‌ی $7/578 < x/H < 8/427$ تعداد ۴ صفحه اثر معکوس داشته و باعث افزایش تنش برشی به اندازه $1/558$ درصد می‌شود که این نتیجه با مشاهدات شجاعی (۲۰۱۰) کاملاً منطبق است، زیرا نامبرده نیز تاثیر تعداد ۴ صفحه مستغرق را در مهار ابعاد حفره آبستستگی ناکارآمد و در تعداد کمی از آزمایش‌ها ناچیز قلمداد کرده است.

در بازه‌ی $8/535 < x/H < 8/761$ ، صفحات اوج تاثیر کاهشی خود را اعمال نموده و مقادیر تنش را با تفاوت محسوسی به میزان $3/338$ درصد تقلیل می‌بخشند. همچنین، مطابق شکل ۱۷، در زاویه‌ی ۳۰ درجه نیز، روندی مشابه با حالت فوق الذکر پیش می‌آید. در این موقعیت نیز صفحات در بازه‌ی $6/802 < x/H < 7/33$ به طور موثر، و با حداقل اختلافی معادل با $1/09$ درصد باعث کاهش تنش برشی می‌شوند. تاثیر معکوس تعداد ۴ صفحه‌ی مستغرق در این حالت در نسبت‌های $8/139 < x/H < 8/139$ به وضوح قابل مشاهده است. از این برهه به بعد، یعنی در بازه‌ی $8/139 < x/H < 8/761$ ، صفحات باعث کاهش موثر میزان تنش برشی به میزان $3/648$ درصد می‌شوند. با توجه به مطالب ذکر شده، تاثیر بهتر زاویه‌ی ۳۰ درجه کاملاً واضح و مبرهن است.

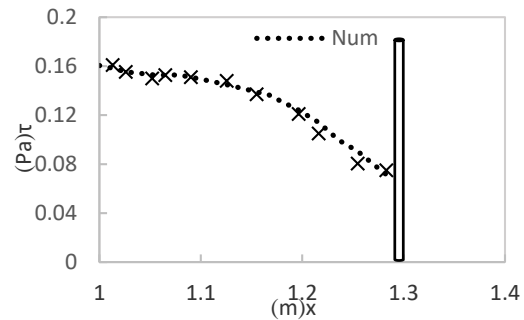
جریان اصلی، و در نهایت ایجاد یک حرکت مارپیچی در پایین‌دست صفحات است، که این حرکت یک تنش برشی را به بستر القا می‌کند. چنانچه در پایین‌دست هر ردیف صفحات، صفحات دیگری نیز قرار داده شوند، الگوی این حرکت مارپیچی تغییر نموده و به تبع آن تنش برشی بستر نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد. همچنین، با توجه به جدول ۲ می‌توان بهترین عملکرد را از لحاظ بیشترین مقدار تنش برشی و محل وقوع آن، به تعداد شش صفحه مستغرق با زاویه ۳۰ درجه نسبت داد. زیرا هم بیشینه‌ی تنش برشی بستر دارای مقادیر کمتری نسبت به بقیه حالات است، و هم در فاصله‌ی دورتری نسبت به پایه اتفاق افتاده است. نتایج استخراج شده‌ی حاضر، با مطالعات شجاعی (۲۰۱۰) همخوانی نسبتاً خوبی دارد، به نحوی که در این مطالعات نیز تعداد ۶ صفحه با زاویه ۳۰ درجه بهترین عملکرد را دارا هست. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به منظور درک بهتر، محور عمودی، که نشانگر مقادیر تنش است با تقسیم بر تنش برشی کل ($\tau/pgHS_f$) و محور افقی که نشانگر فاصله تا پایه است، با تقسیم بر عمق نهر (H) بی بعد شده اند. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، در محور مرکزی با زاویه‌ی ۲۰ درجه، صفحات در بازه‌ی $6/80 < x/H < 7/33$ با حداقل اختلاف $1/23$ درصد نسبت به پایه‌ی منفرد به خوبی قادر به مهار مقادیر تنش برشی بوده‌اند. در این برهه تعداد ۲ صفحه مستغرق بهتر از دیگر مقادیر ایفای نقش کرده است. در نسبت $x/H=7/415$ این

جدول ۲- مقادیر بیشینه‌ی تنش برشی و فاصله‌ی محل وقوع آن از پایه در حالت‌های مختلف صفحات مستغرق

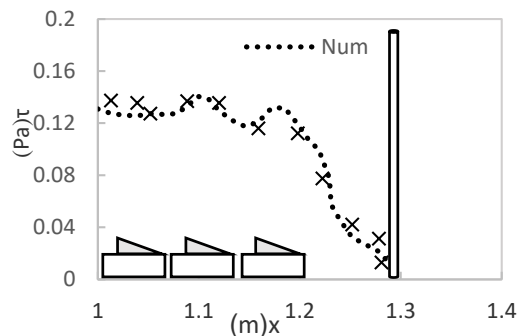
حالت‌های قرارگیری صفحات	الگوی عددی		الگوی شینو و نایت	
	بیشینه‌ی تنش برشی $\left(\frac{N}{m^2}\right)$	فاصله از پایه (m)	بیشینه‌ی تنش برشی $\left(\frac{N}{m^2}\right)$	فاصله از پایه (m)
پایه پل منفرد	۰/۱۶	۰/۲۸۸	۰/۱۶۱	۰/۲۷۶
2P-30°	۰/۱۴۲	۰/۱۷۸	۰/۱۵۱	۰/۱۶۴
4P-30°	۰/۱۶۶	۰/۱۵۵	۰/۱۶۷	۰/۱۵۰
6P-30°	۰/۱۴	۰/۱۸۹	۰/۱۳۶	۰/۱۷۳
2P-20°	۰/۱۳۵	۰/۱۷۵	۰/۱۴۱	۰/۱۶۹
4P-20°	۰/۱۶۲	۰/۱۳۷	۰/۱۶۱	۰/۱۴۲
6P-20°	۰/۱۵۶	۰/۱۷۸	۰/۱۵۹	۰/۱۶۵



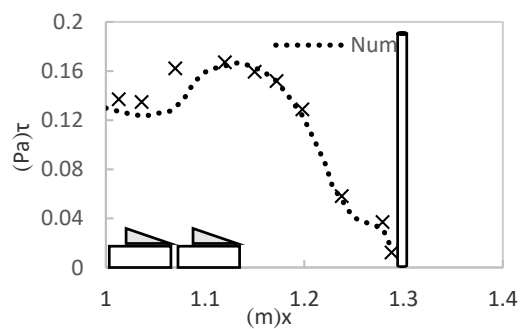
شکل ۱۰- متوسط تنش برشی بستر در پایه با دو صفحه با زاویه 30° .



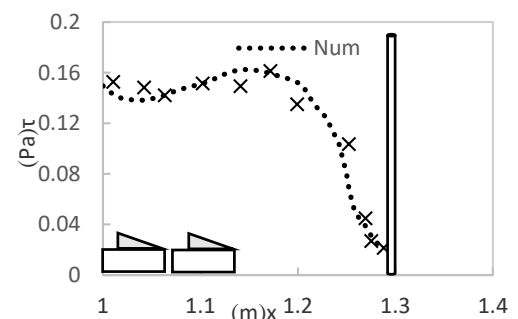
شکل ۹- متوسط تنش برشی بستر در پایه‌ی منفرد(حالت شاهد).



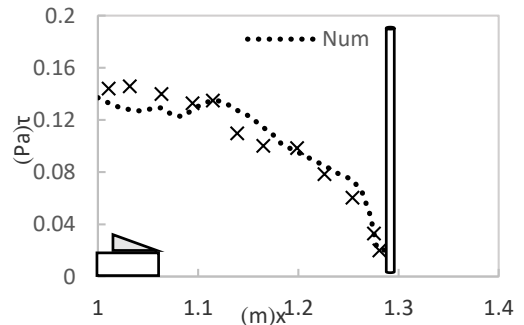
شکل ۱۲- متوسط تنش برشی بستر در پایه با شش صفحه با زاویه 30° .



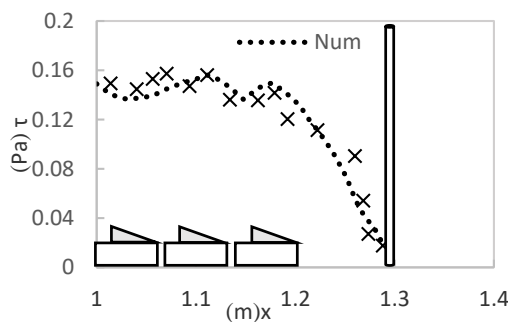
شکل ۱۱- متوسط تنش برشی بستر در پایه با چهار صفحه با زاویه 30° .



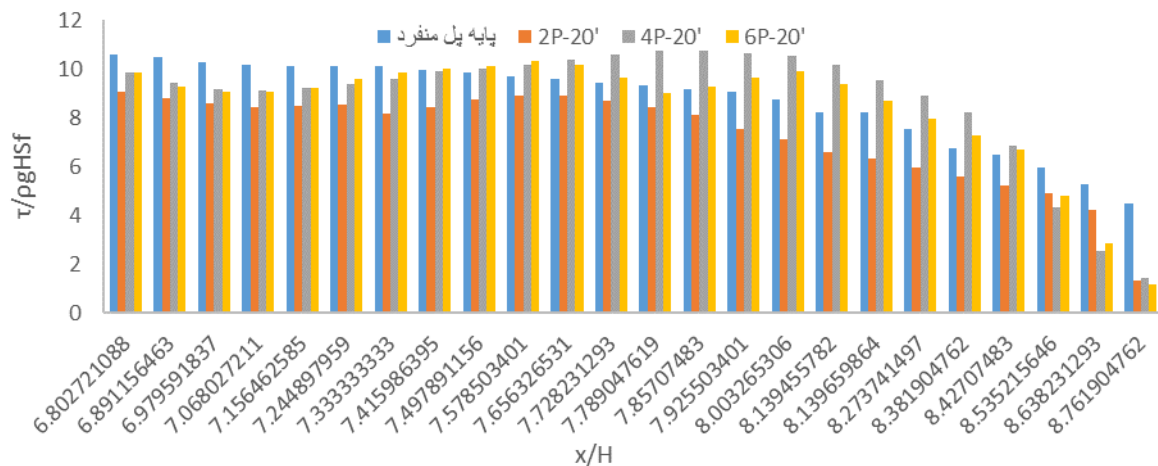
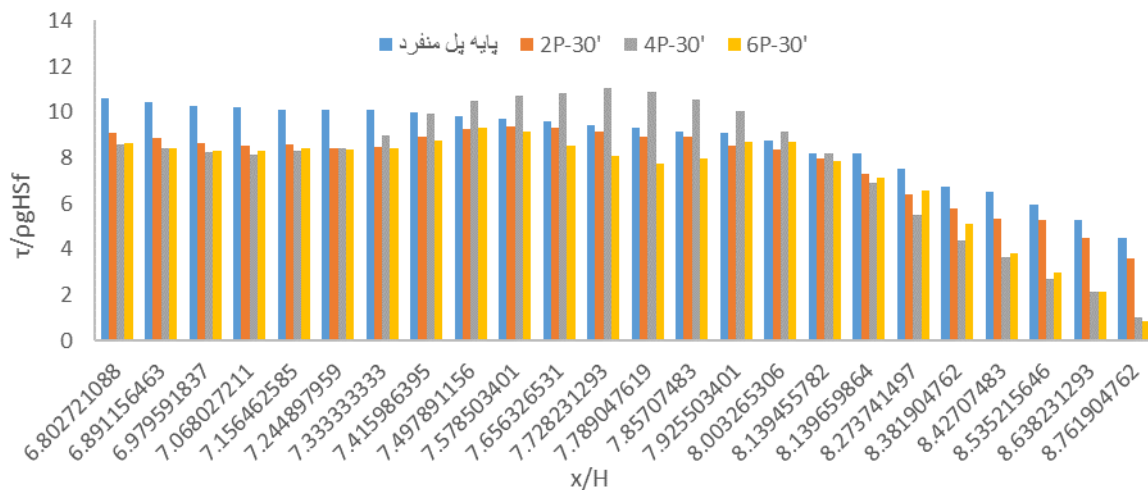
شکل ۱۴- متوسط تنش برشی بستر در پایه با چهار صفحه با زاویه 20° .



شکل ۱۳- متوسط تنش برشی بستر در پایه با دو صفحه با زاویه 20° .



شکل ۱۵- متوسط تنش برشی بستر در پایه با شش صفحه با زاویه 20° .

شکل ۱۶- مقایسه‌ی مقادیر تنش برشی در $\alpha=20^\circ$ شکل ۱۷- مقایسه‌ی مقادیر تنش برشی در $\alpha=30^\circ$

با کاهش متغیرهای موثر در آبشستگی در این روش حفاظتی، این عامل مخرب به‌نحو مطلوبی کاستی می‌پذیرد. قابل ذکر است که نتایج حاصل از هر دو الگوی با نتایج مطالعات تجربی شجاعی (۲۰۱۰) مطابقت قابل قبولی دارند. در مقایسه الگوی عددی فلوئنت با الگوی SKM می‌توان اظهار داشت که هر دو مدل تقریباً دارای عملکرد مشابهی در برآورد تنش برشی کف نهر بوده و در هر دو، شبیه‌سازی جریان گردابه‌ای با دقت بالایی انجام گرفته است.

منابع

(۱) ارونقی، ه. ۲۰۱۰. بررسی کاهش آبشستگی اطراف پایه پل با طوق مستطیلی به‌روش تجربی و با استفاده از شبیه‌سازی الگوی جریان در اطراف آن با مدل‌های آشفتگی. پایان نامه

نتیجه‌گیری

بررسی میدان تنش برشی بستر پیرامون پایه استوانه‌ای با صفحات مستغرق در هر دو الگوی عددی و الگوی شینو و نایت (SKM) نشان می‌دهد که صفحات مستغرق دارای تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش تنش برشی بستر و سرعت جریان پیرامون پایه هستند. به علاوه، می‌توان اضافه نمود که در این روند کاهش زاویه‌ی قرارگیری صفحات نسبت به جریان اصلی در نهر نیز تاثیرگذار بوده است، به‌نحوی که در این رابطه، زاویه‌ی ۳۰ درجه (کاهش حداقل ۱۱ درصدی تنش برشی) موفق‌تر از زاویه‌ی ۲۰ درجه (کاهش حداقل ۴ درصدی تنش برشی) عمل نموده است. در رابطه با تعداد صفحات (۲، ۴ و ۶ صفحه) نیز می‌توان گفت که در صورت به‌کارگیری ۶ صفحه به جای ۲ صفحه، مقدار مؤلفه‌ی افقی سرعت در مجاورت پایه ۱۲ تا ۱۴ درصد کاهش می‌یابد، و در مجموع

- 12) Knight, D.W., Demetriou, J.D., and Hamed, M.E. 1984. Boundary shear in smooth rectangular channels. *Agric. Water Manage*, 11 (4): 405-422.
- 13) Knight, D.W., Shiono, K., and Pirt, J. 1989. Prediction of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow. *International Conference on Hydraulics and Environmental Modeling of Coastal, Estuarine and River Waters, England*. pp. 419-428.
- 14) Mohamad, H. 2013. Numerical simulation of flow and local scour at two submerged-emergent tandem cylindrical piers. *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*, 41 (1): 273-289.
- 15) Shiono, K., and Knight, D.W. 1988. Two dimensional analytical solution for a compound channel. *3rd International Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements, Japan*. pp. 503-510.
- 16) Shiono, K., and Knight, D.W. 1991. Turbulent open channel flows with variable depth across the channel. *J. Fluid Mech.* 222: 617-646.
- 17) Yang, S.Q., and Lim, S.Y. 2002. A geometrical method for computing the distribution of boundary shear stress across irregular straight open channels. *J. Hydr. Res.* 40 (3): 535-542.
- 18) Yen, C.L., Lai, J.S., and Chang, W.Y. 2001. Modeling 3D flow and scouring around circular piers. *Proc. Nati. Sci. Council. ROC (A)*, 25 (1): 17-26.
- دکتری تخصصی سازه‌های آبی. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تبریز.
- ۲) بشارتی‌گیوی، م.، و حکیم‌زاده، ح. ۲۰۱۰. بررسی عددی سه‌بعدی الگوی جریان و تنش برشی بستر اطراف پایه‌های مخروطی. *نشریه مهندسی دریا*. ۶ (۱۱): ۶۳-۷۰.
- ۳) بهداد، ع.، فغفور مغربی، م.، و گیوه‌چی، م. ۲۰۱۱. تعیین توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در کانال روباز مثلثی. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه فردوسی مشهد. ۶۷-۷۸.
- ۴) حسن زاده، ی.، حکیم زاده، ح.، و عیاری، ش. ۲۰۱۲. بررسی اثر اشکال مختلف پایه پل بر الگوی جریان اطراف آن با استفاده از نرم افزار Fluent. *تحقیقات منابع آب ایران*. ۷ (۴): ۹۵-۱۰۵.
- ۵) شجاعی، پ. ۲۰۱۰. تاثیر توام صفحات مستغرق و طوق در کاهش آبستگي پایه استوانه‌ای پل‌ها. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تبریز.
- 6) Abril, J.B., and Knight, D.W. 2004. Stage-discharge prediction for rives in flood applying a depth-averaged model, *J. Hydr. Res.*, 42 (6): 616-629.
- 7) Aghaee, Y., and Hakimzadeh, H. 2010. Three dimensional numerical modeling of flow around bridge piers using LES and RANS. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics. River Flow. Braunschweig, Germany*. 9p.
- 8) Babaeyan-Koopaei, K., Ervine, D.A., and Pender, G. 2002. Field measurements and flow modeling of overbank flows in River Severn. *U.K. J. Environ. Inf.*, 1 (1): 28-36.
- 9) Guo, J., and Julien, P.Y. 2005. Shear stress in smooth rectangular open channel flow. *J. Hydr. Eng. ASCE*, 131 (1): 30-37.
- 10) Kean, J.W., Kuhnle, R.A., Smith, J.D., Alonso, C.V., and Langendoen, E.J. 2009. Test of a method to calculate near-bank velocity and boundary shear stress. *J. Hydr. Eng. ASCE*, 135 (7): 588-601.
- 11) Khodashenas, S.R., and Paquier, A. 1999. A geometrical method for computing the distribution of boundary shear stress across irregular straight open channel. *J. Hydr. Res.*, 37 (3): 381-388.