

تأثیر شیار در کاهش عمق آبستنگی پایه پل استوانه‌ای با استفاده از نرم افزار Flow3D

میلاذ کاظمیان^۱، کاظم اسماعیلی*^۲

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه فردوسی مشهد

۲- عضو هیئت علمی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

(esmaili@um.ac.ir)

خلاصه

آبستنگی از مهم‌ترین عوامل تخریب پایه پل‌هاست. یکی از راه‌های کاهش عمق آبستنگی استفاده از شیار در پایه پل می‌باشد. در این پژوهش از مدل Flow 3D برای شبیه‌سازی تأثیر شیار با ابعاد یکسان در دو موقعیت هم‌تراز با بستر و نزدیک به سطح آب استفاده شد. آزمایش‌ها در دو سرعت نسبی ۰/۸۷ و ۰/۹۲ انجام شد. رسوبات بستر از نوع یکنواخت و غیرچسبیده با انحراف معیار هندسی ۱/۴ و قطر متوسط یک میلی‌متر استفاده شد. نتایج نشان داد که شیار ایجاد شده در پایه پل باعث تضعیف گردابه‌های اطراف پایه شده و در کاهش عمق آبستنگی مؤثر است. شیار نزدیک به سطح، به طور میانگین در حدود ۶ درصد و شیار هم‌تراز با بستر در حدود ۲۶ درصد در کاهش حداکثر عمق آبستنگی نسبت به پایه شاهد مؤثر هستند. هم‌چنین با افزایش عدد فرود از ۰/۳۷۶ به ۰/۳۸۰ عمق آبستنگی در پایه‌های مختلف به طور میانگین ۱۱ درصد افزایش پیدا کرده است.

کلمات کلیدی: آبستنگی، پایه پل، شیار نزدیک به سطح، شیار هم‌تراز با بستر، مدل Flow 3D

۱. مقدمه

آبستنگی پدیده‌ای است که بر اثر اندرکنش شرایط جریان و حرکت مصالح بستر در کناره رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، در اثر عبور جریان صورت می‌گیرد. عمق ناشی از فرسایش بستر نسبت به بستر اولیه را عمق آبستنگی می‌نامند [۱]. در طول ۳۰ سال گذشته بیشتر از ۱۰۰۰ پل از ۶۰۰۰۰۰ پل ساخته شده در ایالت متحده آمریکا تخریب شده‌اند که ۹۰ درصد آن‌ها به دلیل آبستنگی بوده است [۲]. روش‌های کاهش آبستنگی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. در روش اول، بستر تقویت شده و مقاومت آن در مقابل نیروهای محرک افزایش می‌یابد مانند سنگ‌چین و لایه‌های حفاظت بتنی که به آن روش‌های حفاظتی و روش دوم باعث تغییر الگوی جریان در اطراف پایه در جهت کاهش جریان رو به پایین و سیستم‌های گردابی می‌شود که به آن روش‌های اصلاح‌کننده جریان می‌گویند که از این روش می‌توان به استفاده از شمع کوبی، طوق و شکاف اشاره کرد [۳].

اظهري و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی و یک مدل فیزیکی به شبیه‌سازی عمق آبستنگی اطراف یک سری سه‌تایی پایه پل عمودی استوانه‌ای، در یک رودخانه پرداختند. نتایج نشان داد که حداکثر عمق آبستنگی در اطراف پایه اول به وجود آمده و نتایج مدل عددی تطابق خوبی با اطلاعات بدست آمده از مدل فیزیکی دارد [۴]. قادری و عباسی (۲۰۱۹) با استفاده از مدل عددی، آبستنگی موضعی پایه ایرفویل شکل را با در نظر گرفتن طوق بررسی کردند. نتایج نشان دادند که استفاده از طوق در پایه، باعث کاهش حداکثر عمق آبستنگی در جلوی پایه پل و کاهش گردابه‌های پشت پایه می‌شود [۵]. نظری شرایبان (۲۰۲۰) با استفاده از مدل Flow3D تأثیر شمع‌ها با پیکربندی‌های مختلف را بر کاهش عمق آبستنگی پایه پل بررسی کردند. نتایج نشان داد مدل‌هایی که تک شمع در جلوی پایه و با فاصله پنج برابر قطر پایه نصب شده‌اند، در کاهش عمق آبستنگی مؤثرتر هستند [۶].

حسن زاده و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل عددی، تأثیر فاصله و نحوه قرارگیری پایه‌های مجاور بر الگوی جریان و فرسایش بستر ماسه‌ای پیرامون پایه‌های پل را بررسی کردند. با بررسی تغییرات در فاصله بین پایه‌ها در دو حالت، مشخص شد که با کاهش فاصله، به دلیل ایجاد مانع وسیع‌تر در برابر جریان و ایجاد جت آب در بین پایه‌ها، آبستنگی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد [۷]. دانش فراز (۲۰۲۲) تأثیر کابل را بر کاهش آبستنگی پایه پل با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش‌های ANFIS انجام دادند. آنها از دو نوع کابل با قطرهای ۱۰ و ۱۵ درصد قطر پایه و زاویه پیچش به ترتیب ۱۵ و ۱۲ درجه استفاده کردند. نتایج نشان دادند که استفاده از کابل می‌تواند عمق آبستنگی را به ترتیب ۱۰ و ۲۲ درصد کاهش دهد. و انجام

آزمایش‌ها با زوایای صفر، ۱۰ و ۱۵ درجه نسبت به جهت جریان، نشان دادند که پایه‌های با زاویه ۱۵ درجه نسبت به جریان، بیشترین عمق آبستگي را دارند [۸].

تحقیقات بسیاری با استفاده از مدل عددی Flow3D در مورد روش‌های کاهش عمق آبستگي در اطراف پایه‌ی پل استوانه‌ای با استفاده از طوق، شکاف و غیره انجام شده است. در این پژوهش تاثیر شیار در دور بدنه‌ی پایه پل استوانه‌ای، به منظور کاهش عمق آبستگي در دو موقعیت هم‌تراز با بستر و نزدیک به سطح آب با استفاده از مدل Flow 3D بررسی شده که از این منظر منحصر به فرد می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر از مدل Flow 3D برای شبیه‌سازی آبستگي پایه‌پل و تاثیر شیار بر آن استفاده شده است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

۲-۱- مدل عددی Flow3D

مدل Flow3D یکی از مدل‌های بسیار قوی در زمینه‌ی دینامیک سیالات است. این مدل قابلیت تحلیل سه بعدی میدان جریان و همچنین محدوده‌ی کاربردی بسیار وسیعی را در مسائل مربوط به سیالات دارد. و برای حل آبستگي نیز از پنج روش طول اختلاط پراتل، مدل تک معادله‌ای، دو معادله‌ای و $K-\epsilon$ ، RNG و LES بهره می‌برد. معادلات دیفرانسیلی که در مدل Flow-3D باید مورد حل قرار گیرند، می‌توانند در هر دو قالب مختصات کارتزین و استوانه‌ای نوشته شوند.

تحلیل سه بعدی معادلات ناویر استوکس رینولدزی در دستگاه مختصات کارتزین که به روش حجم محدود حل میشوند در حالت سیال تراکم ناپذیر به صورت روابط ۱ تا ۴ می‌باشد.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w A_z)}{\partial z} = R_{SOR} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

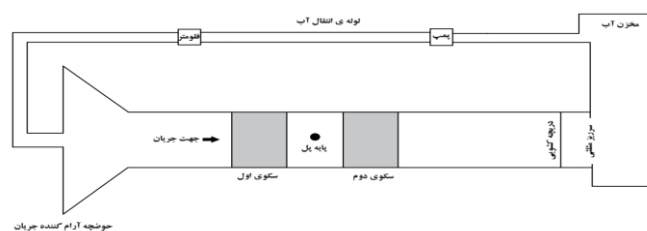
که در آن V_F کسری از حجم مرتبط با جریان، ρ چگالی سیال، (u, v, w) مولفه‌های سرعت، (A_x, A_y, A_z) کسری از مساحت مرتبط با جریان، (G_x, G_y, G_z) شتاب جرمی، R_{SOR} ترم چشمه، (F_x, F_y, F_z) شتاب لزجت در جهت‌های (x, y, z) و p فشار می‌باشند.

۲-۲- مدل آزمایشگاهی مورد استفاده

در این پژوهش از نتایج آزمایشگاهی کاظمیان و همکاران (۱۴۰۰) استفاده شده است [۹]. نتایج آزمایشگاهی بدست آمده برای پایه شاهد، در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰/۵ متر، عرض و ارتفاع ۰/۵ متر انجام گرفت. جنس فلوم از شیشه و پلی‌گلاس و شیب آن ۰/۰۰۱ بود. محل قرارگیری پایه یک صفحه‌ی پلاستیکی از جنس تفلون با ارتفاع ۰/۰۲ متر، عرض ۰/۵ متر بود که در بالادست و پایین دست آن دو سکو به ارتفاع ۰/۱۲ متر، عرض ۰/۵ متر و طول یک متر قرار داشتند. شکل ۱ تصویری از شمای کلی کانال و پایه شاهد مورد استفاده در آزمایشگاه را نمایش می‌دهد.



(ب)



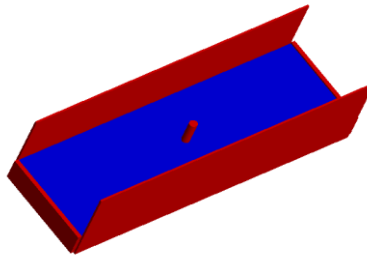
(الف)

شکل ۱- شمای کلی کانال آزمایشگاهی (الف) و پایه بدون شیار یا S0 به عنوان پایه شاهد(ب)

پایه مورد استفاده در آزمایش دارای قطر ۴ سانتی متر می باشد. سرعت نسبی به صورت نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی تعریف می گردد. در این آزمایش از دو سرعت نسبی ۰/۸۷۰ و ۰/۹۲ استفاده شد. رسوبات بستر به صورت یکنواخت و غیر چسبنده با قطر متوسط یک میلی متر و انحراف معیار هندسی ۱/۴ استفاده گردید. و همچنین بستر رسوبات، ۱۵ سانتی متر ارتفاع داشتند.

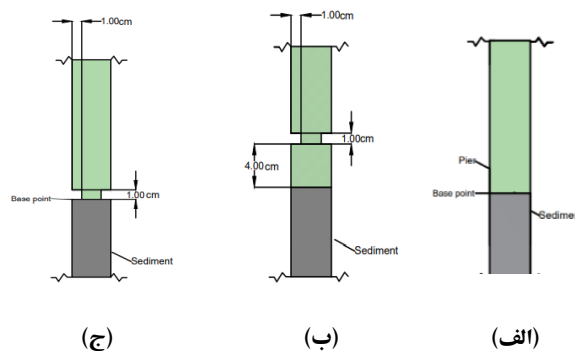
۳-۲-مدل عددی

در این پژوهش برای رسم هندسه کانال و پایه از نرم افزار اتوکد استفاده شد. برای صرفه جویی در زمان محاسبات در حدود ۱/۵ متر از طول کانال آزمایشگاهی شبیه سازی گردید. در شکل ۲ هندسه کانال، بستر و پایه ایجاد شده نشان داده شده است.



شکل ۲- هندسه ایجاد شده توسط نرم افزار اتوکد

پایه های مورد استفاده در مدل عددی شامل سه نوع پایه می باشند. پایه S0 بدون شیار به عنوان پایه شاهد، دارای مشخصات یکسان با نمونه آزمایشگاهی به منظور صحت سنجی نتایج می باشد. ارتفاع و تورفتگی شیار معیاری از قطر پایه معرفی شد و به اندازه یک چهارم قطر پایه مد نظر قرار گرفت. پایه S1 با شیار به ارتفاع یک سانتی متر دور تا دور پایه و موقعیت ۴ سانتی متر از بستر فاصله دارد. پایه S2 دارای شیار با همان مشخصات پایه S1، و در موقعیت هم تراز با بستر قرار دارد. عمق تورفتگی شیار در هر دو نوع پایه شیاردار یک سانتی متر می باشد. به گونه ای که قطر پایه در محل شیار با یک سانتی متر کاهش، ۳ سانتی متر می باشد. مشخصات پایه ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

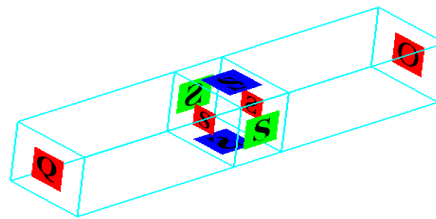


شکل ۳- پایه شاهد(الف)، پایه با شیار نزدیک به سطح (ب) و پایه با شیار هم تراز با بستر(ج)

۱-۳-۲- شرایط اولیه و مرزی

اطلاعات مربوط به رسوبات، سیال و سایر پارامترهای موثر وارد نرم افزار گردید. و همچنین دبی و عمق جریان به عنوان شرایط اولیه به نرم افزار معرفی شد. هندسه مدل وارد نرم افزار شده و برای دقت بیشتر در بدست آوردن عمق آبستگگی و نشان دادن مشخصات پایه، یک بلوک جداگانه در اطراف پایه پل در نظر گرفته شد. شرایط مرزی تعریف شده در این پژوهش در شکل ۴ نمایش داده شده

است که در آن شرط مرزی ورودی (X_{min}) به صورت دبی ثابت (Q) در نظر گرفته شد. در مدل آزمایشگاهی، در مرز ورودی، آب با عمق و دبی معلوم جریان می‌یابد و به همین دلیل از شرط ورودی دبی ثابت با ارتفاع مشخص آب، استفاده گردید. برای خروجی کانال (X_{max}) شرط مرزی به گونه‌ای در نظر گرفته شد که سیال با هوا در ارتباط باشد. همانطور که ذکر شد برای کاهش زمان محاسبات ۱/۵ متر از طول کانال آزمایشگاهی به گونه‌ای شبیه‌سازی شد که پایه در وسط کانال قرار گیرد. مرز مش‌بندی در کف کانال یک سانتی‌متر بالاتر از کف (داخل رسوبات)، و در عرض کانال یک سانتی‌متر از دو طرف دیواره‌ی کانال (با توجه به فاصله یک سانتی‌متری از عرض کانال در دو طرف، مرزهای مش‌بندی در داخل آب و به جای ۵۰ سانتی‌متر ۴۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شد). این مرزها به صورت $symmetry$ (شرایط بیرون شبکه حل دقیقاً مشابه شرایط روی مرز داخلی شبکه در نظر گرفته می‌شود) تعریف شدند. این نوع شرط مرزی در شبیه‌سازی‌های متقارن استفاده می‌شود. سطح آزاد سیال نیز حالت سیمتری در نظر گرفته شد.



شکل ۴- شرایط مرزی ایجاد شده

۲-۳-۲- انتخاب مدل آشفتگی

برای مدل‌سازی آشفتگی در تحقیق حاضر از مدل آشفتگی RNG استفاده شده است. این مدل نسبت به مدل آشفتگی $k-\epsilon$ به ثابت‌های تجربی کمتری نیاز داشته و برای شبیه‌سازی نواحی دارای جداشدگی جریان، عملکرد بهتری نشان داده است [۱۱]. علاوه بر این سه مدل $k-\epsilon$ ، RNG و LES برای بدست آوردن حداکثر عمق آبستگی با شرایط یکسان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که مدل RNG تطابق بهتری با مشاهدات تجربی دارد.

۳. نتایج و بحث

۳-۱- اعتبارسنجی

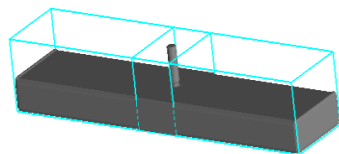
یکی از مهمترین بخشهای حل عددی، تعیین اندازه شبکه‌های محاسباتی یا اندازه سلول‌ها در مش‌بندی است. تعداد سلولها در یک مش بستگی به محدوده و اندازه تعیین شده داشته و بردقت و زمان محاسبات تأثیر می‌گذارد. در نتیجه، لازم است که مش‌بندی مناسبی اتخاذ گردد که هم جوابگوی دقت مورد نیاز در محاسبات باشد و هم از نظر زمان انجام محاسبه در حد متعارفی باشد. در این شبیه‌سازی عددی از شبکه‌بندی کارترین استفاده شده است. شبکه‌بندی مناسب در دو حالت شبکه‌بندی یکنواخت و غیریکنواخت مورد بررسی قرار گرفت و پس از آن با توجه به هندسه مدل و هم‌چنین حساسیت برای مشاهده هر چه بهتر حداکثر عمق آبستگی و محل وقوع آن، در اطراف پایه پل شبکه‌بندی به صورت غیریکنواخت صورت گرفت. به طوری که پایه و اطراف آن دارای شبکه ریزتر باشند.

برای تعیین تعداد مش بهینه، مش‌ها از ۵۰ هزار شروع و با گام‌های ۵۰ هزار افزایش یافت. نتایج نشان داد برای مش‌های کمتر از ۴۰۰ هزار، مرزهای صلب کانال و هم‌چنین شیار موجود در پایه به‌طور کامل توسط مدل قابل‌شناسایی نبود؛ اما به تدریج با افزایش تعداد سلولها، قابلیت شناسایی بیشتر می‌شد. برای نمونه، مرزهای جامد شناسایی شده برای کانال، پایه پل و بستر با تعداد ۲۰۰ هزار مش در شکل (۵-الف) و ۶۰۰ هزار مش در شکل (۵-ب) ارائه شده است. بررسی‌ها نشان داد که برای تعداد مش بیشتر از ۵۰۰ هزار نرم‌افزار می‌تواند تمام قسمتهای کانال را به‌طور کامل بشناسد به همین دلیل برای مش‌های بیشتر از ۵۰۰ هزار، انطباق نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی مدنظر قرار گرفت. برای مش‌های ۵۰۰، ۵۵۰، ۶۰۰، ۶۵۰، ۷۰۰ و ۷۵۰ هزار خطای نسبی بین نتایج مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی مربوط به پایه شاهد برای سرعت نسبی جریان ۰/۹۲ در جدول (۱) ارائه شده است.

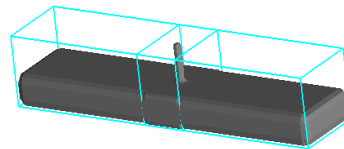
حداکثر
سازی با

خطای نسبی (درصد)	حداکثر عمق آبستگي در مدل عددی (سانتی متر)	حداکثر عمق آبستگي در آزمایشگاه (سانتی متر)	تعداد مش ها (هزار)
48	3.2	6.2	500
46	3.3	6.2	550
25	4.6	6.2	600
3	6	6.2	650
3	6	6.2	700
3	6	6.2	750

جدول ۱-
عمق آبستگي در
آزمایشگاه و مدل
سرعت نسبی ۰/۹۲



(ب)

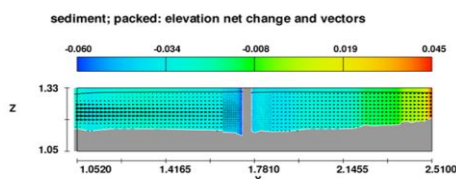


(الف)

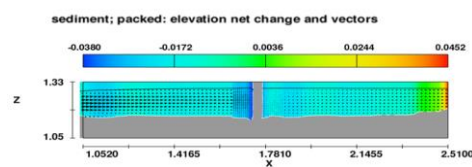
شکل ۵- نمایش شبکه بندی ایجاد شده در نرم افزار (الف) ۲۰۰ هزار مش و (ب) ۶۰۰ هزار مش

برای تعداد مش برابر با ۶۵۰ هزار، خطای نسبی برابر با ۳ درصد و با افزایش تعداد مش ها تا ۷۵۰ هزار تغییر قابل توجهی در حداکثر عمق آبستگي صورت نگرفت. از اینرو برای کاهش محاسبات تعداد مش برابر با ۶۵۰ هزار، به عنوان تعداد مش بهینه انتخاب شد و در ادامه تمامی شبیه سازی های عددی با ۶۵۰ هزار مش انجام شد.

لازم به ذکر است داده های حداکثر عمق آبستگي در جدول فوق برای مدل عددی، در زمان آزمایش ۸۰۰ ثانیه می باشند. مدت زمان انجام آزمایش باید به گونه ای انتخاب شود که بتوان به بیشینه عمق آبستگي رسید و در گودال آبستگي و در محل پایه ها تعادل ایجاد شود. به همین منظور زمان آزمایش با شروع از ۴۰۰ ثانیه و افزودن گام ۲۰۰ ثانیه برای مش بندی های مختلف انجام شد. نتایج نشان داد برای زمان ۸۰۰ ثانیه و مش بهینه ۶۵۰ هزار، خطای نسبی در حدود سه درصد است. و همچنین با افزودن زمان آزمایش به ۱۰۰۰ ثانیه، تاثیری در نتایج آزمایش مشاهده نشد. بنابراین این زمان به عنوان زمان آزمایش در نظر گرفته شد. هدف از این پژوهش تاثیر شیار در کاهش عمق آبستگي پایه پل و مقایسه آبستگي در پایه شیار دار و شاهد می باشد. بنابراین با توجه به اینکه در زمان ۴۰۰ ثانیه در حدود ۶۰ درصد از کل عمق آبستگي رخ داده است، برای صرفه جویی در زمان محاسبات این زمان به عنوان زمان آزمایش مد نظر قرار گرفت. شکل ۶ حداکثر عمق آبستگي با مش بهینه ۶۵۰ هزار را در زمان های ۴۰۰ ثانیه (۶-الف) و ۸۰۰ ثانیه (۶-ب) نمایش می دهد.



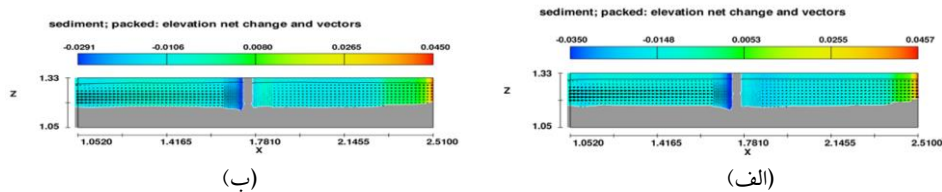
(ب)



(الف)

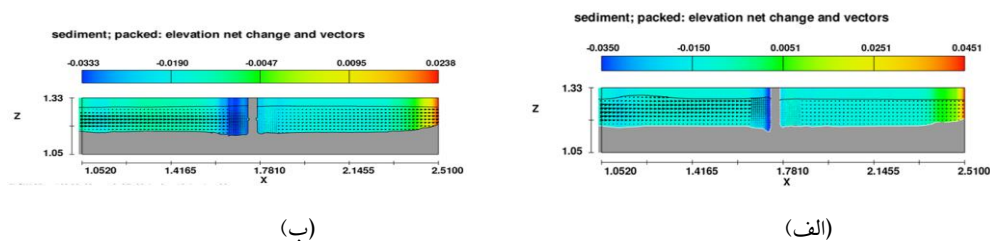
شکل ۶- حداکثر عمق آبستگي بعد از گذشت ۴۰۰ ثانيه (الف) و ۸۰۰ ثانيه (ب)

مقایسه‌ی حداکثر عمق آبستگي در سرعت نسبی ۰/۹۲ در پایه‌های S_1 و S_2 در زمان ۴۰۰ ثانيه در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در سرعت نسبی ۰/۹۲، پایه با شیار نزدیک به سطح (S_1) در حدود ۸ درصد و پایه با شیار هم‌تراز با بستر (S_2) در حدود ۲۴ درصد نسبت به پایه شاهد در کاهش حداکثر عمق آبستگي تاثیر داشته‌اند.



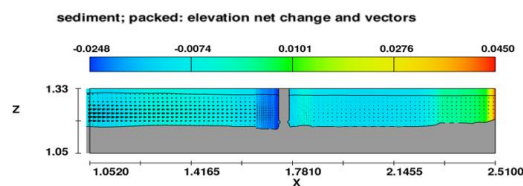
شکل ۷- حداکثر عمق آبستگي در پایه S_1 (الف) و پایه S_2 (ب) در سرعت نسبی ۰/۹۲

مقایسه‌ی حداکثر عمق آبستگي در پایه‌های S_0 ، S_1 و S_2 با سرعت نسبی ۰/۸۷ در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در دبی ۱۰ لیتر بر ثانيه، شیار نزدیک به سطح در حدود ۴/۸ درصد و شیار هم‌تراز با بستر در حدود ۲۹ درصد نسبت به پایه شاهد در کاهش عمق آبستگي تاثیر داشته‌اند. و هم‌چنین با افزایش دبی و به تبع آن افزایش سرعت نسبی، عمق آبستگي در مدل‌های مختلف پایه افزایش یافته است.



(ب)

(الف)



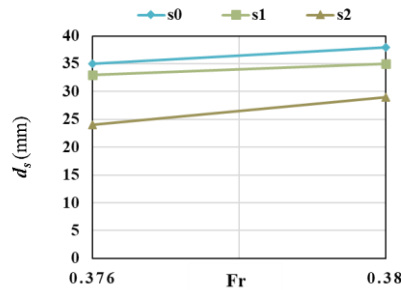
(ج)

شکل ۸- حداکثر عمق آبستگي با سرعت نسبی ۰/۸۷۰ در پایه شاهد (الف)، پایه با شیار نزدیک به سطح (ب) و پایه با شیار نزدیک به بستر (ج)

عدد فرود در کانال مستطیلی به صورت رابطه‌ی ۵ تعریف می‌گردد.

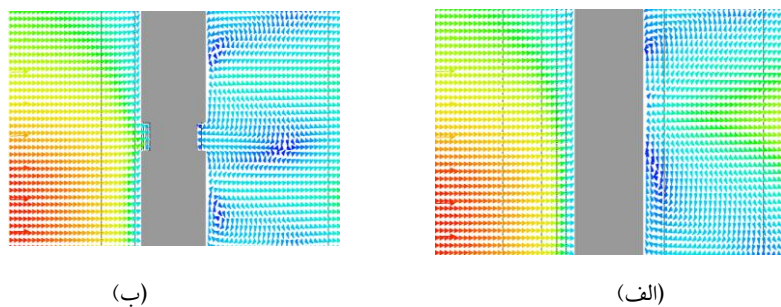
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad (5)$$

که در آن V سرعت جریان، g شتاب گرانش و Y عمق جریان می‌باشد. شکل ۹ تاثیرات افزایش عدد فرود در حداکثر عمق آبهستگی در پایه شاهد (S_0)، پایه با شیار نزدیک به سطح (S_1) و پایه هم‌تراز با بستر (S_2) نشان داده شده است. نتایج نشان داد با افزایش عدد فرود از ۰/۳۷۶ به ۰/۳۸۰، حداکثر عمق آبهستگی در پایه های S_0 ، S_1 و S_2 به ترتیب در حدود ۶، ۸ و ۲۰ درصد افزایش داشته است.



شکل ۹ - تاثیرات افزایش عدد فرود در عمق آبهستگی در پایه های مختلف

شکل ۱۰ بردارهای سرعت در پایه شاهد و پایه با شیار نزدیک به سطح نشان داده شده است. با توجه به شکل نتایج نشان داد که استفاده از شیار در دور پایه ی پل باعث تضعیف گردابه‌های اطراف پایه ی پل به عنوان عامل اصلی پدیده ی آبهستگی و هم‌چنین کاهش سرعت جریان و عدد فرود در آن ناحیه می‌گردد.



شکل ۱۲ - بردارهای سرعت در اطراف پایه شاهد (الف) و پایه با شیار نزدیک به سطح (ب)

۶. نتیجه گیری

به طور کلی می‌توان گفت با افزایش شدت جریان و به تبع آن عدد فرود و سرعت جریان، عمق آبهستگی افزایش خواهد یافت. با افزایش سرعت نسبی از ۰/۸۷ به ۰/۹۲، عمق آبهستگی به طور میانگین در حدود ۱۱ درصد افزایش یافته است. نتایج نشان داد که در سرعت‌های نسبی متفاوت به طور میانگین، شیار دور پایه در موقعیت نزدیک به سطح آب (S_1)، ۶ درصد و در موقعیت هم‌تراز با بستر (S_2)، در حدود ۲۶ درصد در کاهش حداکثر عمق آبهستگی موثر هستند. به طور کلی استفاده از شیار در دور پایه ی پل باعث تضعیف گردابه‌های اطراف پایه ی پل و سرعت در آن ناحیه می‌شوند و باعث کاهش عمق آبهستگی می‌گردند.

۸. مراجع

۱. شفعاى بچستان، م. ۱۳۹۲. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. اداره چاپ و نشر دانشگاه شهید چمران اهواز.

2. Sumer, B.M. and Fredsoe, J. (2002). *The mechanics of scour in the marine environment*. Advanced series

on ocean engineering, vol 17. World Scientific.

3. Mashahir, M. B and Zarrati, A. R. (2002). *Effect of Collar on Time Development of Scouring around Rectangular Bridge Piers*. International Journal of Engineering, Transactions B: Applications 25(1©):11-17.

4. Azhari, A. and Saghravani, S.F. and Mohammadnezhad, B.A., (2010), "3D Numerical modelling of local scour around the cylindrical bridge piers," XVIII International Conference on Water Resources CMWR 2010 J. Carrera (Ed) CIMNE, Barcelona.

5. Ghaderi, A., & Abbasi, S. (2019). *CFD simulation of local scouring around airfoil-shaped bridge piers with and without collar*. *Sādhanā*, 44, 1-12.

6. Nazari-Sharabian, M., Nazari-Sharabian, A., Karakouzian, M., & Karami, M. (2020). *Sacrificial piles as scour countermeasures in river bridges a numerical study using flow-3D*. *Civil Engineering Journal*, 6(6), 1091.

۷. حسن زاده، یوسف، کاردان، نازیلا، و تمیزی، علی. (۱۳۹۹). مطالعه عددی تأثیر فاصله و نحوه قرارگیری پایه های مجاور بر الگوی جریان و فرسایش بستر ماسه ای پیرامون پایه های پل. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۵۱(۷)، ۱۷۳۷-۱۷۵۳. SID. <https://sid.ir/paper/380195/fa>

8. Daneshfaraz, R., Abam, M., Heidarpour, M., Abbasi, S., Seifollahi, M., & Abraham, J. (2022). *The impact of cables on local scouring of bridge piers using experimental study and ANN, ANFIS algorithms*. *Water Supply*, 22(1), 1075-1093.

۹. کاظمیان، میلاد، گوهری، سعید، & شاهوردی، کاظم. (۱۴۰۰). تأثیر ارتفاع و موقعیت عمودی شکاف در کاهش آبشستگی پایه پل استوانه‌ای در بستر با رسوبات یکنواخت و غیریکنواخت. نشریه هیدرولیک، ۱۶(۴)، ۳۷-۴۸. doi: 10.30482/jhyd.2021.285672.1527

10. Sicilian JM, Hirt CW and Harper RP, (1987). *FLOW-3D: Computational modeling power for scientists and engineers*. Report FSI-87-00-1, Flow Science, Los Alamos, NM.