

تحلیل عددی تاثیر آرایش گروه پایه های پل بر الگوی آبشستگی

حسن نمیمی^۱، ابراهیم نوحانی^{۲*}

۱. گروه عمران، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

۲. گروه عمران، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، nohani_e@yahoo.com

چکیده

در پژوهش حاضر تغییرات عمق آبشستگی و شکل حفره آبشستگی در اطراف گروه پایه 2×4 با تغییر نسبت فاصله بین پایه ها به قطر آنها و دبی های مختلف با استفاده از نرم افزار FLOW-3D مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از پروفیل طولی آبشستگی در محدوده قرارگیری گروه پایه ها نشان می دهد که انطباق نسبتا خوبی بین نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی وجود دارد. به منظور بررسی کمی نتایج، میزان نسبت طول و عرض محدوده فرسایش به قطر پایه ها و همچنین حداکثر عمق آبشستگی حاصل از شبیه سازی استخراج با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج مقایسه نشان می دهد که میزان خطای مدل در پیش بینی طول فرسایش، عرض فرسایش و حداکثر عمق فرسایش به ترتیب برابر با $8/7\%$ ، $37/5\%$ و $9/8\%$ می باشد. به طور متوسط، مدل عددی در پیش بینی پارامترهای فرسایش در محدوده گروه پایه ها با خطایی حدود $7/95\%$ مواجه است. درصد خطای نسبی بدست آمده در خصوص شبیه سازی پارامترهای حفره آبشستگی توسط نرم افزار با توجه به پیچیدگی های بحث آبشستگی قابل قبول می باشد. بنابراین هرچه نسبت فاصله پایه ها به قطر آنها بیشتر باشد، میزان خطا کمتر خواهد بود. نتایج تحلیل داده های عددی بدست آمده روی آبشستگی حول گروه پایه در اثر جریان پایدار نشان می دهد که برای گروه پایه مطالعه شده، عمق آبشستگی نسبی به پارامترهای بدون بعد، نسبت عمق جریان به قطر پایه و نسبت فاصله بین پایه ها به قطر پایه بستگی دارد. همچنین فاصله بین پایه ها، رابطه عکس با عمق آبشستگی دارد. ضمن این که افزایش فاصله بین پایه ها، شکل حفره آبشستگی را نیز تحت تاثیر قرار می دهد.

واژه های کلیدی: گروه پایه های پل، آبشستگی، نرم افزار FLOW-3D، تحلیل عددی و قطر پایه

مقدمه

آبشستگی پایه ها است. آبشستگی بستر رودخانه در مجاورت پایه های پل و کم بودن عمق کارگذاری شمع ها و فونداسیون پل منجر به آن شده که همه ساله پل های زیادی در سراسر جهان حین وقوع سیلاب ها تخریب شوند. لذا طی سال های اخیر، موضوع آبشستگی پایه به یکی از کانون های توجه برای محققان تبدیل شده است.

با استفاده از مدل های فیزیکی می توان رفتار آبشستگی را هم برای پل های در حال احداث و هم برای پل های ساخته شده بررسی نمود. این روش به علت مشاهده ای بودن و دقت قابل قبول نتایج آن،

هنگامی که سازه ای در بستر رودخانه قرار می گیرد، تغییراتی را در جریان رودخانه اعمال می کند که سبب ایجاد جریان های گردابی برخاستگی و جریان نعل اسبی می شود. از اینرو ظرفیت رسوب در سیال افزایش می یابد و منجر به آبشستگی می گردد [۱]. مکانیزم های مختلفی روی آبشستگی تاثیر دارند که همین امر باعث شده تا این پدیده، ماهیتی بسیار پیچیده داشته باشد. از جمله این مکانیزم ها می توان به عامل تقویت کننده، گردابه های ریزنده، عامل حفاظتی و گردابه های نعل اسبی به هم فشرده اشاره کرد [۲]. یکی از مهم ترین دلایل تخریب پل ها، بی توجهی به طراحی و ساخت ابزار پیشگیری از

دلار خسارت شد. در سیلاب حاصل از طوفان آلبرتو در سال ۱۹۹۴ در جورجیا، بیش از ۵۰۰ پل دچار آبستگي شدید شده و ۷۳ دهنه از آنها نیاز به تعمیر اساسی یا تعویض پیدا نمود.

با توجه به مسائل مطرح شده، مطالعه پارامترهای موثر بر آبستگي اطراف پایه های پل به شدت حائز اهمیت می باشد. بیشتر مطالعاتی که تا کنون انجام یافته، براساس مطالعات آزمایشگاهی و مدل های فیزیکی بوده که هزینه گزافی را طلبیده و در تمامی شرایط قابل استفاده نمی باشد. بنابراین استفاده از یک مدل عددی توانمند در این زمینه می تواند راهگشا باشد و نتایج مطلوب را با صرف هزینه و وقت کمتر ارائه دهد. لذا هدف از این تحقیق، شبیه سازی سه بعدی الگوی جریان و آبستگي بستر اطراف گروه پایه با مدل FOLLOW-3D مبتنی بر روش حجم محدود می باشد.

مروری بر پژوهش های پیشین

اتما و همکاران (۲۰۰۶) بیان می کنند که مسیر چرخشی - ماریچی گردابه های برخاستگی باعث می شود ذرات رسوب تا بیش از ۸۰ درصد عمق جریان از سطح بستر در پشت پایه بلند شده و به پایین دست منتقل گردد. هنگامی که گرداب برخاستگی به سمت پایین دست حرکت می کند ضعیف گشته و در نتیجه رسوب مجدداً بر روی بستر فرو می افتد، در نتیجه آن بستری تلماسه شکل در پایین دست پایه تشکیل می - شود. با عمیق تر شدن حفره، این گرداب نقش به مراتب مهم تری را در انتقال رسوبات از داخل حفره که دیگر در معرض جریان عمومی داخل آبراهه نمی باشد به خارج از آن ایفا می کنند.

تعداد کمی از محققین پدیده آبستگي در گروه پایه را مطالعه کرده اند، که از مهم ترین آنها می توان به موارد زیر اشاره کرد: بهشتی در طول تحقیقات خود بر اساس تحلیل داده های آزمایشگاهی بدست آمده

راه حل خوبی برای بررسی رفتار آبستگي و نهایتاً تعیین عمق فرسایش می باشد.

روش دوم استفاده از مدل سازی عددی برپایه تئوری ها و روابط ریاضی می باشد. در ابتدا با استفاده از روابط مربوط به فرسایش و تئوری های ارائه شده در رابطه با هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب، یک مدل ریاضی تهیه می گردد. سپس مدل عددی برای حل مدل های ریاضی تهیه شده در میدان جریان و حالات مختلف آبستگي ساخته می شود.

در روش سوم با استفاده از داده های صحرایی پل های ساخته شده، مشکلات موجود شناسایی شده و طرح مورد نظر در برابر تهدیدات آبستگي، محافظت و تقویت می شود. البته باید توجه داشت که تجهیزات دارای قابلیت رفتارسنجی آبستگي مورد استفاده در این روش، بسیار گران و پرهزینه می باشند.

عواملی که باعث تشکیل الگوی جریان پیچیده اطراف پایه می شوند، شامل برخورد جریان به پایه و جدا شدن جریان از پایه های پل می باشد. الگوی جریانی که در اطراف پل شکل می گیرد، به طور مستقیم و غیرمستقیم با یکی از این دو عامل در ارتباط است. برخورد جریان به پایه، گرداب نعل اسبی را شکل داده و جدایی جریان از پایه، باعث تشکیل گرداب هایی می شود که به گرداب برخاستگی موسوم هستند.

طبق گزارش های منتشر شده، در طول ۳۰ سال بیش از هزار پل از میان ۶۰۰،۰۰۰ پل موجود در ایالات متحده آمریکا دچار تخریب و نقص شده اند که در این میان ۶۰ درصد این خرابی ها ناشی از آبستگي گزارش شده است. آبستگي موضعی مسئول تخریب ۱۷ پل در نیویورک و نیوانگلند در طول سیلاب های بهار سال ۱۹۸۷ می باشد. براساس گزارش اداره راه فدرال آمریکا، از تخریب ۳۸۳ پل به دلیل سیلاب های مخرب سال ۱۹۷۳، ۲۵٪ خرابی ها در اثر تخریب پایه و ۷۵٪ در اثر تخریب کوله ها یا تکیه گاه های پل ها بوده است. سیلاب سال ۱۹۹۳ در می سی سی پی شمالی باعث تخریب پل با تخمین حدود ۱۵ میلیون

ایشان با انجام آزمایشات متعدد بر روی گروه پایه‌های گرد در شرایط آب زلال دو رابطه زیر را به ترتیب برای تخمین عمق آبشستگی پایه جلویی و پایه‌های پشتی ارائه کرد:

$$\frac{y_{SF}}{y_s} = 1.9 \left(\frac{s}{a} \right)^{-0.1} \quad (1)$$

$$\frac{y_{SR}}{y_s} = 1.65 \alpha^{0.13} \left(\frac{s}{a} \right)^{-0.07} \quad (2)$$

که در آن y_{SF} عمق آبشستگی پایه جلویی، y_s عمق آبشستگی تک پایه گرد، y_{SR} عمق آبشستگی پایه‌های پشتی، α زاویه برخورد جریان به گروه پایه، s فاصله مرکز به مرکز دو پایه و a قطر پایه ها می باشد [۵].

چپو و همکاران (۱۹۸۷) دو پایه گرد با قطر ۴ cm در دو حالت قرارگیری در راستای جریان و در عرض جریان با فواصل مختلف مورد آزمایش قرار دادند. فواصل بین پایه‌ها در این آزمایش‌ها ۲، ۳ و ۴ برابر قطر پایه‌ها بوده‌است. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال با نسبت سرعت برشی بستر به سرعت برشی بحرانی برابر ۰/۹۲۳ انجام گرفته‌است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ آورده شده‌است [۶]. با مقایسه داده‌های مندرج در این جدول با تحقیقات هانا (۱۹۷۸) می‌توان نتیجه گرفت که در حالت قرارگیری دو پایه در راستای جریان، عمق آبشستگی برای پایه جلویی مشابه یکدیگر بوده ولی برای پایه پشتی این عمق بیشتر می‌باشد.

روی آبشستگی حول گروه پایه، در اثر جریان پایدار مشاهده نمود که عمق آبشستگی نسبی به پارامترهای بدون بعد، نسبت عمق جریان به قطر پایه، نسبت فاصله بین پایه‌ها به قطر پایه و عدد فرود بستگی دارد [۲].

هانا (۱۹۷۸) آبشستگی موضعی را در گروه شمع استوانه‌ای شکل با دو پایه تحت شرایط جریان دائمی یکنواخت و آبشستگی آب زلال بررسی کرد [۳]. وی مشاهده کرد که با افزایش فاصله بین پایه‌ها تأثیر عامل تقویت کننده کاهش می‌یابد و در حالتی که فاصله بین پایه‌ها ۲/۵ برابر قطر پایه‌ها باشد، تأثیر عامل تقویت کننده ماکزیمم خواهد بود. وی مشاهده کرد که در گروه پایه‌های متقاطع با جهت جریان با افزایش فاصله بین پایه‌ها از تأثیر گرداب‌های نعل اسبی بهم فشرده شده، کاسته می‌شود.

ادیان و همکاران نیز نتایج مشابهی برای گروه پایه دوتایی بدست آوردند. آنها در آزمایشات خود بیشترین تأثیر پدیده تقویت کننده را در حالتی که فاصله پایه‌ها دو برابر قطر پایه بود مشاهده کردند. آزمایشات آنها نشان داد که با افزایش فاصله پایه‌ها، تأثیر پدیده‌های مؤثر بر آبشستگی گروه پایه‌ها کاهش یافته و عمق آبشستگی در گروه پایه‌ها به عمق آبشستگی در تک پایه نزدیک می‌شود [۴].

غضنفری هاشمی تحقیقاتی راجع به گروه پایه‌های ۴ و ۶ تایی انجام داد و روابطی برای تخمین عمق آبشستگی پایه جلویی و پایه‌های پشتی ارائه نمود.

جدول ۱- مقادیر نسبت عمق آبشستگی گروه پایه به عمق آبشستگی تک پایه

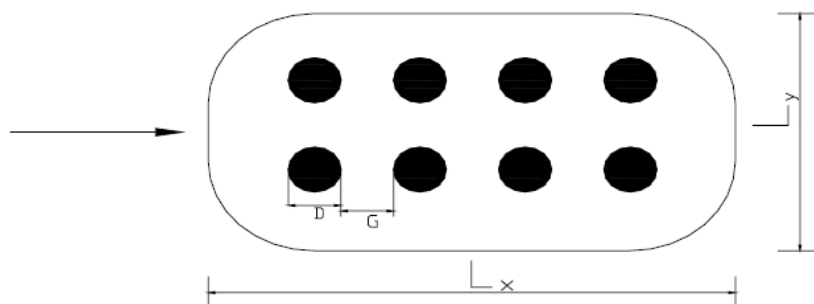
نسبت فاصله به قطر پایه	دو پایه در راستای جریان	
	پایه پشتی	پایه جلویی
۲	۲.۳	۲.۵۸
۳	۲.۲۸	۲.۵۵
۴	۲.۲۵	۲.۵۳

ها از دو پایه مدور به قطرهای 0.16 m و 0.22 m استفاده شده است. آزمایش ها برای فواصل مختلف بین پایه ها (G) انجام شده به طوری که این فواصل منظور بررسی فرسایش از یک لایه رسوب یکنواخت با قطر میانگین (d_{50}) برابر با 0.98 mm و انحراف میانگین هندسی $1/13$ که در سطح بستر کانال پخش شده استفاده گردیده است. همچنین آزمایشات برای دو دبی $3/29$ و $4/93$ لیتر بر ثانیه با دو عمق جریان مختلف به ترتیب $3/4\text{ cm}$ و $4/7\text{ cm}$ انجام شده بود. کلیه آزمایشات در شرایط آب صاف انجام شده بود به طوری که هیچگونه حمل رسوبی از بالادست مدل به درون حفره آبشستگی وجود نداشته است. مدت زمان آزمایش ۷ ساعت منظور شده است.

روش انجام پژوهش

در این تحقیق با استفاده از مدل عددی FLOW-3D به بررسی عددی تغییرات عمق آبشستگی و شکل حفره آبشستگی در اطراف گروه پایه و مقایسه آن با مدل فیزیکی پرداخته شده است و پس از کالیبره نمودن مدل عددی با نتایج مدل فیزیکی و صحت سنجی مدل عددی، میزان آبشستگی ناشی از شرایط جدید مورد بررسی و مقایسه با شرایط مدل فیزیکی قرار گرفته است.

مطالعه آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف انجام شده است. این آزمایش در یک فلوم به طول 4 m ، عرض 0.41 m و ارتفاع 0.25 m با در نظر گرفتن یک گروه پایه 2×4 (شکل ۱) انجام شده است. برای ایجاد مدل



شکل ۱- گروه پایه آزمایش شده به همراه تعریف پارامترها

دهد. ستون های ۶ و ۷ از روی ستون های ۳، ۴ و ۵ بدست آمده اند. بقیه ستون ها مربوط به اندازه گیری های انجام شده است. در ستون ۲ علامت ∞ نمایانگر پایه منفرد می باشد.

شکل ۲ حفره آبشستگی در حالت تعادل را با $2D$ $G = 4/7\text{ cm}$ و $D = 2/2\text{ cm}$ نشان می دهد.

نتایج و بحث

جدول ۲ نتایج بدست آمده از آزمایشات برای گروه پایه 2×4 در فواصل مختلف بین پایه ها را نشان می دهد. در این جدول، ستون های ۱ و ۲ خصوصیات مدل پایه ها، ستون های ۳ و ۴ خصوصیات جریان و ستون ۵ شرایط بحرانی برای حرکت ذرات بستر را نشان می

جدول ۲- شرایط و نتایج آزمایشات آبشستگی

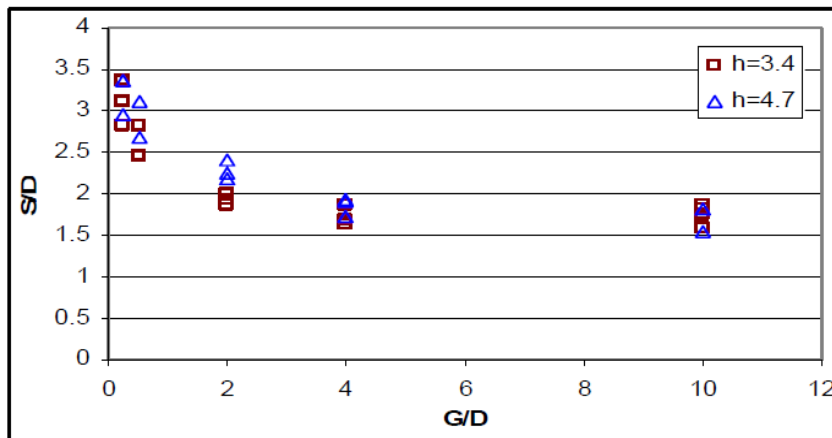
قطر پایه، D(cm) (۱)	G/D (۲)	عمق آب، h(cm) (۳)	U_0 (m/s) (۴)	U_{0c} (m/s) (۵)	U_0 / U_{0c} (۶)	F_r (۷)	S / D (۸)	L_x (cm) (۹)	L_y (cm) (۱۰)
۱/۶	∞	۴/۷	۰/۲۵۶	۰/۳۲۸	۰/۷۸	۰/۳۷۷	۱/۸۱	۶/۳۷	۶/۳۷
۱/۶	۰/۲۵	۴/۷	۰/۲۵۶	۰/۳۲۸	۰/۷۸	۰/۳۷۷	۳/۳۱	۱۴/۳۸	۱۳/۱۲
۱/۶	۰/۵	۴/۶	۰/۲۶۲	۰/۳۲۶	۰/۸۰	۰/۳۹۰	۳/۱۲	۱۴/۷۵	۱۲/۸۸
۱/۶	۲	۴/۷	۰/۲۵۶	۰/۳۲۸	۰/۷۸	۰/۳۷۷	۲/۲۵	۱۶/۲۵	۱۳/۵۰
۱/۶	۴	۴/۸	۰/۲۵۱	۰/۳۲۹	۰/۷۶	۰/۳۶۶	۲	۲۱/۸۸	۱۴/۵۰
۱/۶	∞	۳/۳	۰/۲۴۳	۰/۳۰۷	۰/۷۹	۰/۴۲۷	۱/۸۸	۶/۸۷	۹
۱/۶	۰/۲۵	۳/۴	۰/۲۳۶	۰/۳۰۹	۰/۷۶	۰/۴۰۹	۳/۱۲	۱۴/۶۲	۱۳/۵۰
۱/۶	۰/۵	۳/۴	۰/۲۳۶	۰/۳۰۹	۰/۷۶	۰/۴۰۹	۲/۸۱	۱۳/۷۵	۱۱/۸۸
۱/۶	۲	۳/۴	۰/۲۳۶	۰/۳۰۹	۰/۷۶	۰/۴۰۹	۲	۱۵/۵۰	۱۰/۶۲
۱/۶	۲	۳/۵	۰/۲۲۹	۰/۳۱۰	۰/۷۴	۰/۳۹۱	۱/۹۴	۱۵/۵۰	۱۰/۷۵
۱/۶	۴	۳/۵	۰/۲۲۹	۰/۳۱۰	۰/۷۴	۰/۳۹۱	۱/۷۵	۲۱/۳۸	۱۲/۱۲
۱/۶	۴	۳/۵	۰/۲۲۹	۰/۳۱۰	۰/۷۴	۰/۳۹۱	۱/۶۹	۲۱	۱۱/۸۸
۱/۶	∞	۳/۵	۰/۲۲۹	۰/۳۱۰	۰/۷۴	۰/۳۹۱	۱/۷۵	۶/۷۵	۸/۵۰
۱/۶	۲	۴/۷	۰/۲۵۶	۰/۳۲۸	۰/۷۸	۰/۳۷۷	۲/۳۸	۱۶/۸۸	۱۴/۳۰
۲/۲	∞	۴/۷	۰/۲۵۶	۰/۳۲۸	۰/۷۸	۰/۳۷۷	۱/۵۴	۵/۵۹	۵/۴۱
۲/۲	۰/۲۵	۴/۷	۰/۲۵۶	۰/۳۲۸	۰/۷۸	۰/۳۷۷	۲/۹۱	۱۴/۳۹	۱۲/۹۸
۲/۲	۰/۵	۴/۸	۰/۲۵۱	۰/۳۲۹	۰/۷۶	۰/۳۶۶	۲/۶۸	۱۳/۰۴	۱۰/۷۷
۲/۲	۲	۴/۸	۰/۲۵۱	۰/۳۲۹	۰/۷۶	۰/۳۶۶	۲/۱۸	۱۶	۱۰/۸۲
۲/۲	۴	۴/۸	۰/۲۵۱	۰/۳۲۹	۰/۷۶	۰/۳۶۶	۱/۷۳	۲۱/۱۸	۱۱/۷۳
۲/۲	∞	۳/۳	۰/۲۴۳	۰/۳۰۷	۰/۷۹	۰/۴۲۷	۱/۵۹	۱۳/۹	۱۳/۴
۲/۲	۰/۲۵	۳/۷	۰/۲۱۷	۰/۳۱۴	۰/۶۹	۰/۳۶۰	۲/۹۱	۱۳/۳	۱۱/۲۵
۲/۲	۰/۵	۳/۴	۰/۲۳۶	۰/۳۰۹	۰/۷۶	۰/۴۰۹	۲/۴۵	۱۲/۷۷	۱۰/۲۳
۲/۲	۲	۳/۴	۰/۲۳۶	۰/۳۰۹	۰/۷۶	۰/۴۰۹	۲	۱۵/۸۲	۱۰/۸۲
۲/۲	۲	۳/۵	۰/۲۲۹	۰/۳۱۰	۰/۷۴	۰/۳۹۱	۱/۸۶	۱۵/۷۳	۱۰/۲۷
۲/۲	۴	۳/۴	۰/۲۳۶	۰/۳۰۹	۰/۷۶	۰/۴۰۹	۱/۵۹	۲۱	۹/۸۲
۲/۲	۴	۳/۵	۰/۲۲۹	۰/۳۱۰	۰/۷۴	۰/۳۹۱	۱/۱۸	۱۹/۲۷	۹/۷۳
۲/۸	∞	۴/۸	۰/۲۵۱	۰/۳۲۹	۰/۷۶	۰/۳۶۶	۱/۱۸	۶/۵۷	۷/۵



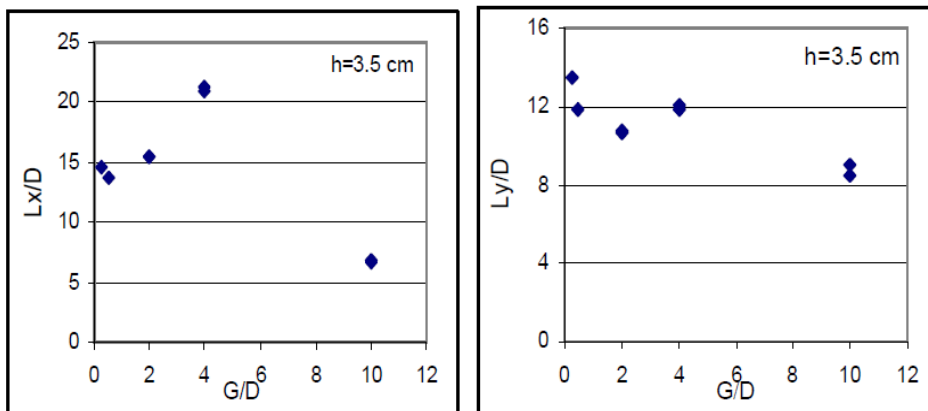
شکل ۲- حفره آبشستگی ایجاد در اطراف گروه پایه ($D = 2/2 \text{ cm}$ و $h = 4/7 \text{ cm}$ ، $G = 2D$)

پایه (G/D) و شکل ۴ توسعه پلان حفره آبشستگی (L_x/D و L_y/D) را در برابر G/D نشان می دهد.

شکل ۳ نسبت حداکثر عمق آبشستگی به قطر پایه (S/D) را در مقابل سبب فاصله بین پایه ها به قطر



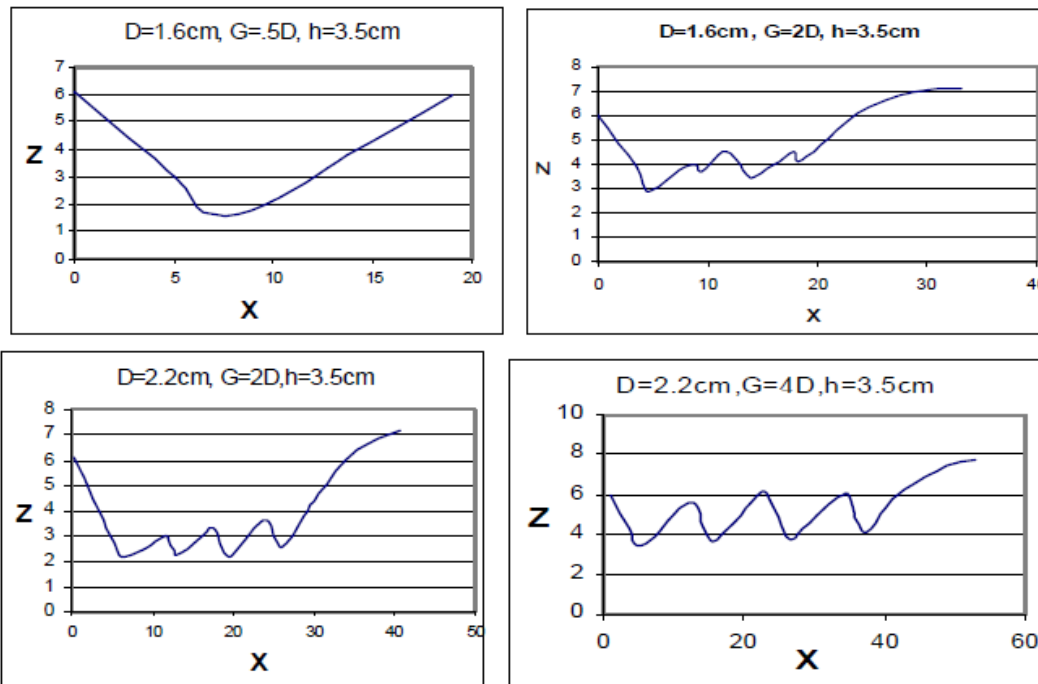
شکل ۳- عمق تعادل آبشستگی، رسم شده در مقابل فاصله بین پایه ها



شکل ۴- توسعه پلان حفره آبشستگی در برابر تغییرات فاصله بین پایه ها

در اثر گرداب نعل اسبی، گردابه های ریزنده و انقباض خطوط جریان اتفاق می افتد، در حالی که آبشستگی عمومی در اثر تغییر سرعت جریان در فاصله بین پایه ها و آشفتگی ایجاد شده توسط هر یک از پایه ها ایجاد می شود. همچنین زمانی که فاصله بین پایه ها ۴ برابر قطر هر یک از پایه ها است، حداکثر عمق آبشستگی در جلوی همه پایه ها تقریباً یکسان می باشد، چون برای فواصل بزرگتر، پایه ها اثر چندانی روی یکدیگر ندارند. بر اساس مطالعات انجام شده روی گروه پایه دو تایی در راستای مسیر جریان و همچنین عمود بر مسیر جریان، زمانی که نسبت فاصله بین پایه ها به قطر پایه برابر ۱۰ باشد، پایه ها هیچ گونه اثر متقابلی بر یکدیگر نخواهند داشت.

اثر متقابل بین پایه ها با کاهش فاصله بین پایه ها بیشتر می شود، به طوری که برای فواصل خیلی کم بین پایه ها، میزان حداکثر عمق آبشستگی تقریباً ۲ برابر این مقدار برای پایه منفرد می باشد. میزان حداکثر عمق آبشستگی برای فواصل کوچکتر (۰/۵ و ۰/۲۵ = G/D) در بین پایه ها و در ردیف اول اتفاق می افتد. در صورتی که برای فواصل بزرگتر در جلوی پایه ها و در ردیف اول اتفاق می افتد. همچنین با افزایش فاصله بین پایه ها، شکل حفره آبشستگی تغییر می کند، به طوری که در شکل ۵ دیده می شود برای فواصل بزرگتر، در اطراف پایه ها دو نوع آبشستگی ایجاد شده است. یک نوع آبشستگی موضعی در اطراف هر یک از پایه ها و همچنین یک نوع آبشستگی عمومی در اطراف گروه پایه ایجاد شده است. آبشستگی موضعی



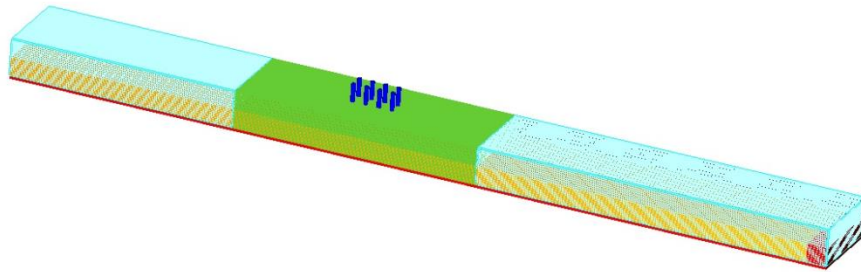
شکل ۵- پروفیل حفره آبشستگی برای فواصل مختلف بین پایه ها

مکعب مستطیل با طول ۴/۱ m، عرض ۰/۴۱ m و ارتفاع ۰/۱۵ m انتخاب شد. دانه بندی بستر در طول ۴ m با قطر ۰/۰۰۰۹۸ m می باشد. سپس اطلاعات

پس از انجام مطالعه آزمایشگاهی، مدل سازی عددی گروه پایه مورد بررسی با استفاده از نرم افزار FOLLOW-3D انجام شد. هندسه دامنه به صورت

باشد، انتخاب شده و هندسه مدل ساخته شد که در شکل ۶ نشان داده شده است.

فیزیک مساله در مدل وارد گردید. در مرحله بعدی سیال موردنظر که آب با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد می



شکل ۶- نمایی از هندسی مدل در نرم افزار FOLLOW-3D

مشخصات رسوب مدل عددی با توجه به اجراهای بسیاری که جهت بدست آوردن مقادیر بهینه انجام شده است به شرح جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات رسوب

قطر رسوب	چگالی رسوب	ضریب درگ	ضریب ورودی ذرات	ضریب بار بستر	زاویه ایستایی
۰/۰۰۰۰۹۸ m	۲۶۵۰ kg/m ³	۰/۵	۰/۰۱۸	۵/۷	۳۵

مورد مطالعه، از روش سرعت بحرانی حرکت ذرات استفاده شده است. در بحث واسنجی و صحت سنجی کمی نرم افزار از روش مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج مدل های آزمایشگاهی استفاده شده است. بدین منظور شبیه سازی منطبق بر آزمایشی که با دبی ۳/۲۹ لیتر بر ثانیه، G/D برابر ۲ و قطر پایه cm ۱/۶ انجام شده صورت گرفته است که در ادامه نتایج حاصله به صورت کمی و کیفی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

واسنجی کیفی نتایج مدل عددی

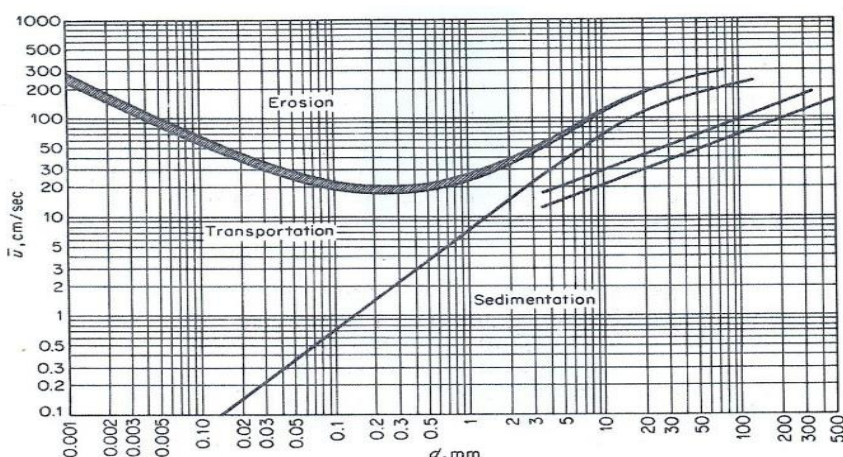
دانشمندان متعددی جهت بررسی سرعت بحرانی انتقال ذره به تحقیق پرداخته اند و معادلاتی جهت تعیین سرعت بحرانی در شرایط گوناگون ارائه نموده

در مرحله بعدی با استفاده از بخش شبکه بندی (مش بندی) نرم افزار، شبکه برای مدل موردنظر ایجاد شد. هر چه این شبکه بندی با ابعاد سلول های کوچکتر انجام گیرد، دقت نتایج بالاتر خواهد بود. جهت بهبود نتایج و بالا رفتن سرعت نرم افزار به جای استفاده از تعداد سلولهای بیشتر، مش بندی در فواصل با حساسیت بیشتر متراکم تر انتخاب شد و بدین ترتیب مش ها از حالت مکعب مربع به حالت مکعب مستطیل تغییر شکل دادند. سایر مراحل انجام شده شامل معرفی شرایط مرزی و معرفی خصوصیات رسوب در نرم افزار می باشد.

پس از انجام مراحل فوق، واسنجی نرم افزار به ۲ روش کمی و کیفی انجام شد. به منظور بررسی کیفی امکان وقوع فرسایش و یا عدم وقوع فرسایش در مدل

نشان می دهد که سرعت متوسط جریان در محدوده پایه های پل در حدود 0.34 m/s می باشد که این بیانگر وجود فرسایش در محدوده پایه های پل می باشد که عملاً این پدیده در شبیه سازی انجام شده مشاهده گردید. در مقابل سرعت جریان در بازه بالادست و پایین دست پایه های پل به طور متوسط حدود 0.25 m/s می باشد که اولاً کمتر از سرعت بحرانی حرکت ذرات بدست آمده از مدل آزمایشگاهی می باشد و ثانیاً فرسایش ناشی از حرکت جریان با این سرعت در شبیه سازی انجام شده مشاهده نگردید. به عبارتی نرم افزار از نظر کیفی قادر به شبیه سازی پدیده فرسایش در محدوده گروه پایه ها مشابه مدل آزمایشگاهی می باشد.

اند. هیلستروم^۱ (۱۹۵۳) نموداری را مطابق شکل ۶ جهت تعیین سرعت بحرانی ارائه نمود. بر اساس این نمودار و توسط خطی که بین ناحیه Erosion و Transportation قرار دارد، می توان سرعت متوسط (u) در شرایط بحرانی (آستانه حرکت) را تعیین نمود. در این نمودار، علاوه بر سرعت آستانه حرکت، سرعت های رسوب گذاری را نیز می توان بدست آورد. بررسی های مدل آزمایشگاهی نشان داد که برای حرکت ذرات رسوب به قطر متوسط 0.18 mm ، متوسط سرعت جریان باید بیش از 0.32 m/s باشد که با انتقال این دو مقدار بر روی نمودار هیلستروم، محل تلاقی در مرز منطقه Erosion قرار می گیرد. بررسی نتایج بدست آمده از مدل عددی انجام شده برای مرحله واسنجی



شکل ۶- تعیین مقدار سرعت بحرانی حرکت و رسوب گذاری بر اساس اندازه ذرات

قرار گرفته است. شکل ۷ پروفیل طولی آبستکی در محدوده قرار گیری گروه پایه ها را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می گردد انطباق نسبتاً خوبی بین نتایج مدل آزمایشگاهی و عددی وجود دارد. به منظور بررسی کمی نتایج، میزان نسبت طول و عرض محدوده فرسایش به قطر پایه ها حاصل از شبیه سازی استخراج و با نتایج مدل آزمایشگاهی در جدول ۴ مقایسه گردید. همچنین در جدول مذکور حداکثر عمق

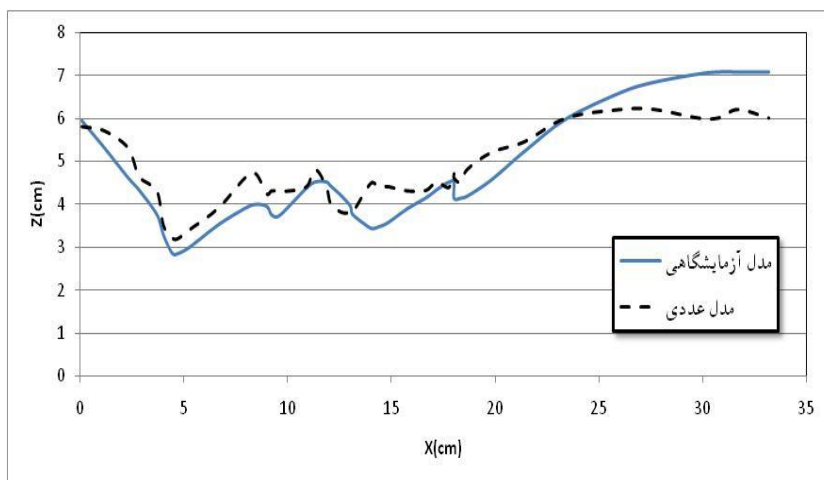
واسنجی کمی نتایج مدل عددی

در این قسمت به جهت واسنجی کمی نرم افزار، نتایج مدل عددی انجام شده با نتایج آزمایش صورت گرفته در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی در خصوص بررسی تغییرات عمق آبستکی و شکل حفره آبستکی در اطراف گروه پایه نسبت به تغییر فاصله بین پایه ها برای دبی 1 l/s مورد مقایسه G/D برابر ۲ و قطر پایه $1/6 \text{ cm}$ مورد مقایسه

¹ Hiulstrom

باشد. درصد خطای نسبی بدست آمده در خصوص شبیه سازی پارامترهای حفره آبستنگی در محدوده گروه پایه ها توسط نرم افزار با توجه به پیچیدگی های مبحث آبستنگی قابل قبول می باشد. بنابراین برای ارزیابی دقت مدل در شبیه سازی دیگر آزمایش های انجام شده از مدل نهایی و واسنجی شده استفاده گردید که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

آبستنگی حاصل از شبیه سازی با نتیجه مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج مقایسه نشان می دهد که مدل در پیش بینی طول فرسایش با خطای حدود ۸/۷٪، در پیش بینی عرض فرسایش با خطایی حدود ۵/۳۷٪ و در پیش بینی حداکثر عمق فرسایش با خطای حدود ۹/۸٪ مواجه است. بطور متوسط، مدل عددی در پیش بینی پارامترهای فرسایش در محدوده گروه پایه ها با خطایی در حدود ۷/۹۵٪ مواجه می



شکل ۲- پروفیل حفره آبستنگی برای فواصل مختلف بین پایه ها

جدول ۴- مقایسه میزان نسبت طول، عرض و حداکثر عمق فرسایش به قطر پایه حاصل از شبیه سازی عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی

Q	D	G/D	Lx/D		درصد خطای نسبی	Ly/D		درصد خطای نسبی	S/D		درصد خطای نسبی
			مدل آزمایشگاهی	مدل عددی		مدل آزمایشگاهی	مدل عددی		مدل آزمایشگاهی	مدل عددی	
۳/۲۹	۱/۶	۲	۱۵/۵	۱۴/۱۴	۸/۷	۱۰/۷۵	۱۰/۱۷	۵/۳۷	۱/۹۴	۱/۷۵	۹/۸

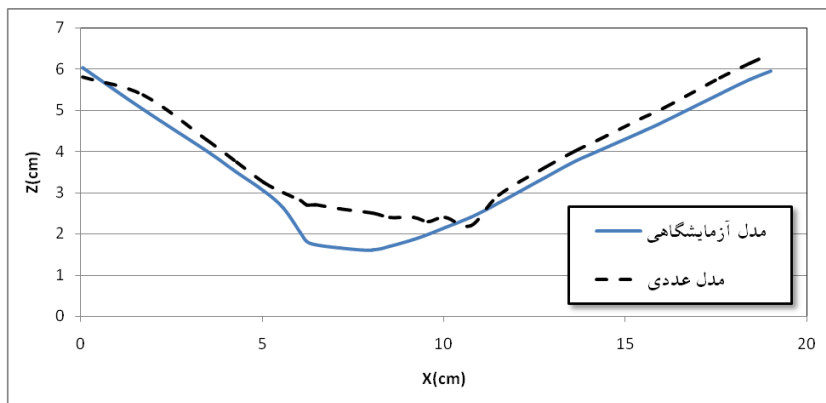
پایه برای سه نمونه از شبیه سازی ها استخراج و با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج این مرحله در شکل های زیر ارائه گردیده است. همانطور که ملاحظه گردید، مدل در شبیه سازی پروفیل آبستنگی از دقت نسبتا خوبی در مقایسه با نتایج مدل آزمایشگاهی برخوردار است. به منظور بررسی پارامترهای

شبیه سازی اثر فاصله بین پایه ها روی پارامترهای آبستنگی در محدوده گروه پایه ها این شبیه سازی بر اساس دبی $3/29 \text{ l/s}$ و نسبت (G/D) های مختلف برای قطر پایه های $1/6 \text{ cm}$ و $2/2 \text{ cm}$ با استفاده از نرم افزار FLOW-3D انجام شد. پروفیل طولی آبستنگی در محدوده گروه

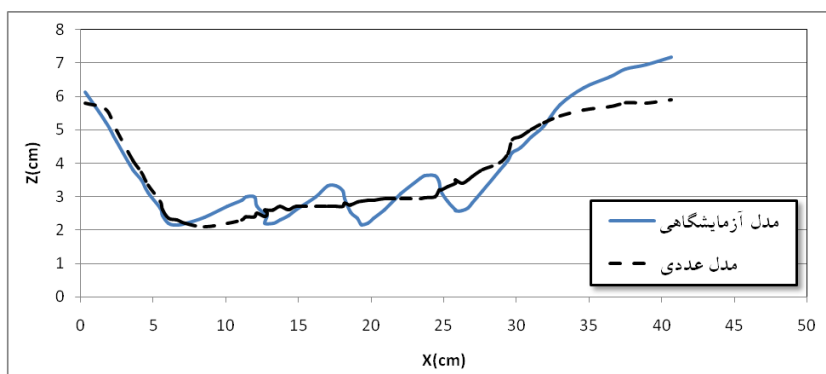
حدود ۸/۷٪، در پیش بینی عرض فرسایش با خطایی حدود ۵/۳۷٪ و در پیش بینی حداکثر عمق فرسایش با خطای حدود ۹/۸٪ مواجه است. بطور متوسط، مدل عددی در پیش بینی پارامترهای فرسایش در محدوده گروه پایه ها با خطایی در حدود ۷/۹۵٪ مواجه می باشد. درصد خطای نسبی بدست آمده در خصوص شبیه سازی پارامترهای حفره آبشستگی در محدوده گروه پایه ها توسط نرم افزار با توجه به پیچیدگی های مبحث آبشستگی قابل قبول می باشد. بنابراین برای ارزیابی دقت مدل در شبیه سازی دیگر آزمایش های انجام شده از مدل نهایی و واسنجی شده استفاده گردید که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

آبشستگی، شامل طول و عرض و حداکثر عمق فرسایش حاصل از شبیه سازی عددی و مقایسه آن با مدل آزمایشگاهی، نتایج استخراج شده و در شکل های زیر ارائه گردیده است.

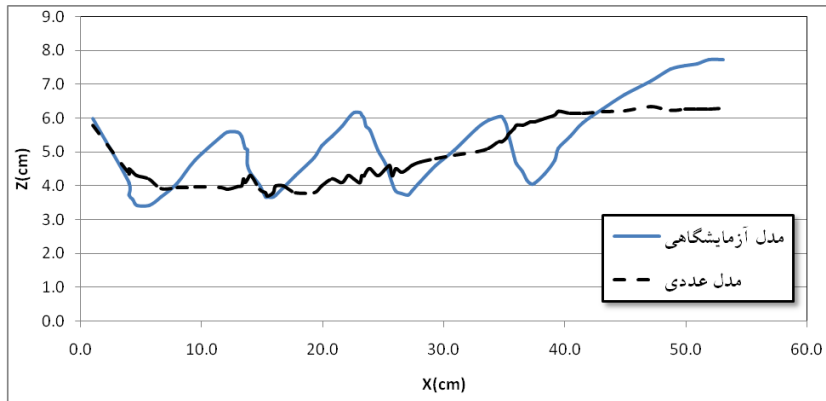
همانطور که ملاحظه شد در مدل عددی نیز با افزایش فاصله بین پایه ها پارامتر آبشستگی کاهش یافته است. بر اساس نمودارهای مذکور اختلاف کمی بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. در جدول ۵ به صورت کمی درصد خطای نسبی مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی در پیش بینی پارامترهای مذکور تعیین شده است. براساس این نتایج، مدل عددی در پیش بینی طول فرسایش با خطای



شکل ۸- پروفیل حفره آبشستگی برای فواصل مختلف بین پایه ها با $Q=329 \text{ lit/s}$ و با مشخصات $D=1.6 \text{ cm}$, $G=0.5D$, $h=3.5 \text{ cm}$



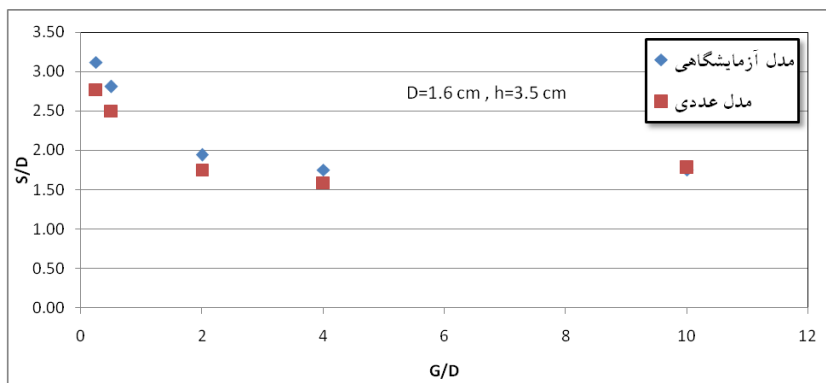
شکل ۹- پروفیل حفره آبشستگی برای فواصل مختلف بین پایه ها با $Q=329 \text{ lit/s}$ و با مشخصات $D=2.2 \text{ cm}$, $G=2D$, $h=3.5 \text{ cm}$



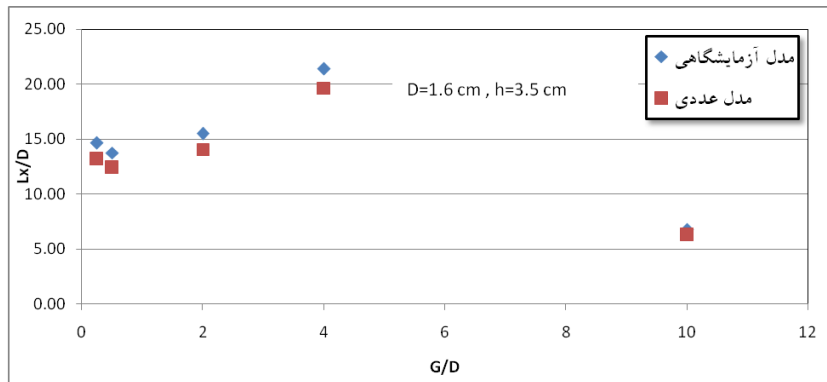
شکل ۱۰- پروفیل حفره آبستکی برای فواصل مختلف بین پایه ها با $Q=329 \text{ lit/s}$ و با مشخصات $D=2.2 \text{ cm}$, $G=4D$, $h=3.5 \text{ cm}$

جدول ۵- مقایسه میزان نسبت طول، عرض و حداکثر عمق فرسایش به قطر پایه ها حاصل از شبیه سازی عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی

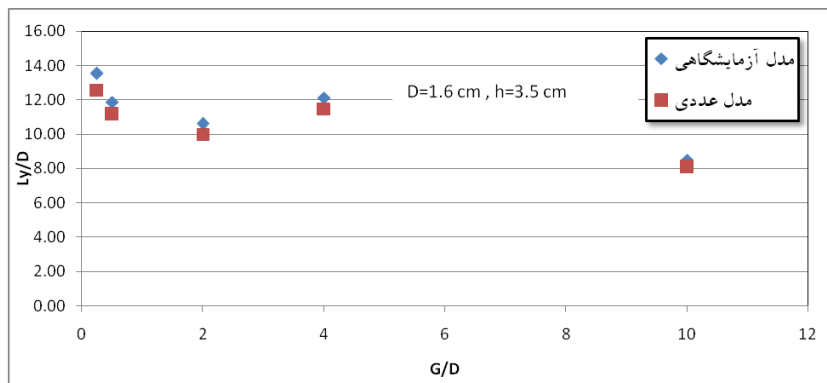
Q(lit/s)	D(cm)	G/D	Lx/D		درصد خطای نسبی	Ly/D		درصد خطای نسبی	S/D		درصد خطای نسبی
			مدل آزمایشگاهی	مدل عددی		مدل آزمایشگاهی	مدل عددی		مدل آزمایشگاهی	مدل عددی	
۳/۲۹	۱/۶	۰/۲۵	۱۴/۶۲	۱۳/۱۸	۱۰/۴	۱۳/۵	۱۲/۵۸	۶/۸	۳/۱۲	۲/۷۷	۱۱/۲
۳/۲۹	۱/۶	۰/۵	۱۳/۷۵	۱۲/۴۱	۹/۷	۱۱/۸۸	۱۱/۱۵	۶/۱	۲/۸۱	۲/۵۰	۱۰/۸
۳/۲۹	۱/۶	۲	۱۵/۵	۱۴/۱۵	۸/۷	۱۰/۶۲	۱۰/۰۴	۵/۳۷	۱/۹۴	۱/۷۵	۹/۸
۳/۲۹	۱/۶	۴	۲۱/۳۸	۱۹/۶۴	۸/۱	۱۲/۱۲	۱۱/۴۸	۵/۲	۱/۷۵	۱/۵۹	۸/۹
۳/۲۹	۱/۶	۱۰	۶/۷۵	۶/۲۵	۷/۳	۸/۵	۸/۰۹	۴/۸	۱/۷۵	۱/۶	۸/۵



شکل ۱۱- عمق تعادل آبستکی رسم شده در مقابل فاصله بین پایه ها در دبی برابر $Q=329 \text{ lit/s}$



شکل ۱۲- توسعه پلان آبشستگی در برابر تغییرات فاصله بین پایه ها در دبی برابر $Q=329 \text{ lit/s}$

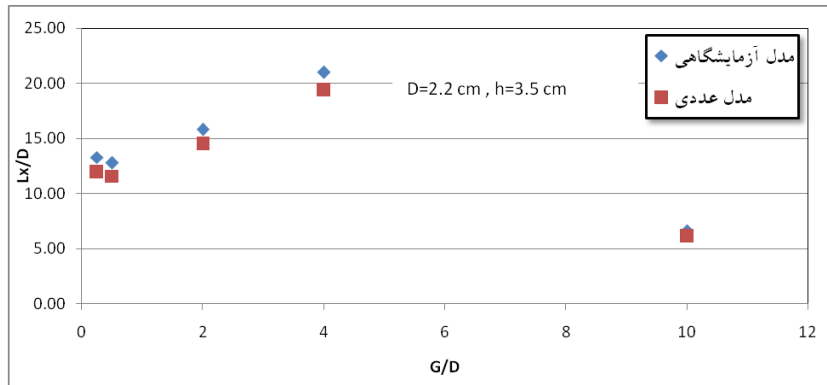


شکل ۱۳- توسعه پلان آبشستگی در برابر تغییرات فاصله بین پایه ها در دبی برابر $Q=329 \text{ lit/s}$

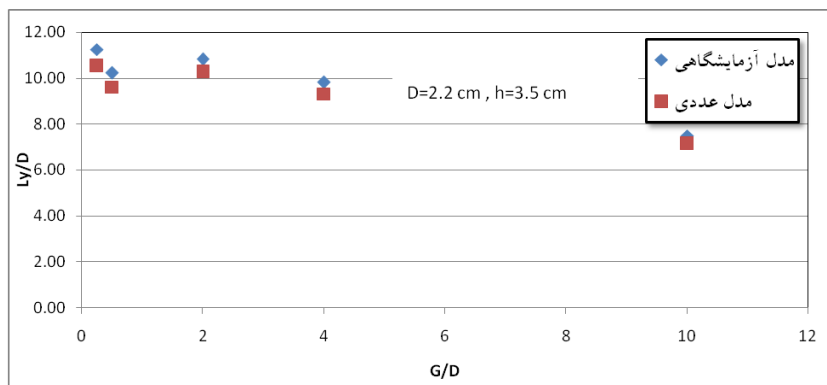
جدول ۶- مقایسه میزان نسبت طول، عرض و حداکثر عمق فرسایش به قطر پایه ها حاصل از شبیه سازی

عددی با نتایج مدل آزمایشگاهی

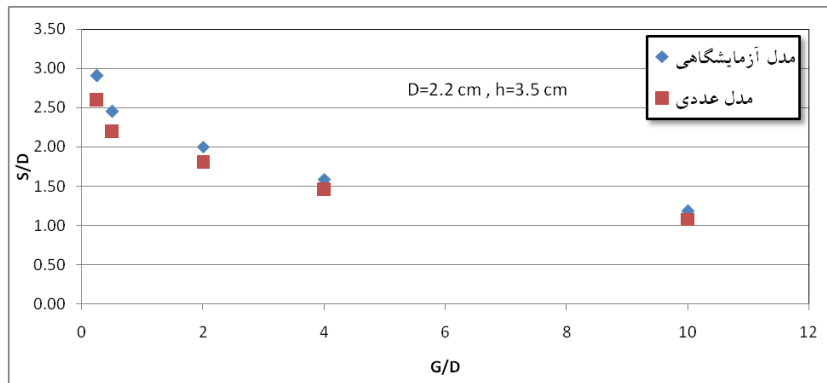
Q(lit/s)	D(cm)	G/D	Lx/D		درصد خطای نسبی	Ly/D		درصد خطای نسبی	S/D		درصد خطای نسبی
			مدل آزمایشگاهی	مدل عددی		مدل آزمایشگاهی	مدل عددی		مدل آزمایشگاهی	مدل عددی	
			۳/۲۹	۲/۲	۰/۲۵	۱۳/۳	۱۱/۹۵	۱۰/۱	۱۱/۲۵	۱۰/۵۳	۶/۴
۳/۲۹	۲/۲	۰/۵	۱۲/۷۷	۱۱/۵۸	۹/۳	۱۰/۲۳	۹/۶۱	۵/۹۸	۲/۴۵	۲/۱۹	۱۰/۶
۳/۲۹	۲/۲	۲	۱۵/۸۲	۱۴/۴۷	۸/۵	۱۰/۸۲	۱۰/۲۶	۵/۱۷	۲	۱/۸	۹/۷
۳/۲۹	۲/۲	۴	۲۱	۱۹/۳۶	۷/۸	۹/۸۲	۹/۳۱	۵/۱	۱/۵۹	۱/۴۵	۸/۷
۳/۲۹	۲/۲	۱۰	۶/۵۷	۶/۱	۷/۱	۷/۵	۷/۱۳	۴/۹	۱/۱۸	۱/۰۸	۸/۱



شکل ۱۴- توسعه پلان آبستگي در برابر تغيرات فاصله بين پایه ها در دبي برابر $Q=329 \text{ lit/s}$



شکل ۱۵- توسعه پلان آبستگي در برابر تغيرات فاصله بين پایه ها در دبي برابر $Q=329 \text{ lit/s}$



شکل ۱۶- توسعه پلان آبستگي در برابر تغيرات فاصله بين پایه ها در دبي برابر $Q=329 \text{ lit/s}$

نتیجه گیری ها

با توجه به مطالب ارائه شده در خصوص بررسی تغییرات عمق آبستگي و شکل حفره آبستگي در اطراف گروه پایه‌ها در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی

مورد بررسی قرار گرفت و نتایج و پیشنهادات این تحقیق شرح زیر ارائه می گردد:
 ۱- درصد خطای نسبی مشاهده شده در مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در مجموع بطور متوسط کمتر از ۷.۹۵٪ مشاهده گردید که با توجه به

۲- با توجه به اینکه درصد خطای نتایج آبستکی در این تحقیق مقدار کمی نیست، لازم است تا این شرایط با مدل دیگری شبیه‌سازی شده و با این تحقیق مقایسه گردد.

۳- با توجه به پیچیدگی فرایند آبستکی، بررسی میزان آبستکی اطراف گروه پایه‌ها با مقاطع مختلف و با آرایش‌های متفاوت می‌تواند یافته‌های این پژوهش را توسعه دهد.

۴- بررسی تاثیر روش‌های حفاظتی بر آبستکی اطراف پایه‌های با هندسه پیچیده.

۵- بررسی و ارزیابی میدانی نتایج مربوط به جریان و آبستکی در رودخانه‌های کشور.

مبحث پیچیده آبستکی و رسوب، این درصد خطای نسبی قابل قبول می‌باشد.

۲- با افزایش نسبت فاصله پایه‌ها به قطر آنها مقدار آبستکی کاهش می‌یابد و بالعکس.

۳- برای فواصل کوچک بین پایه‌ها، حداکثر عمق آبستکی حدود دو برابر مقدار متناظر برای پایه منفرد می‌باشد. با افزایش فاصله بین پایه‌ها، عمق آبستکی کاهش پیدا کرده و مساوی عمق آبستکی در پایه منفرد می‌باشد.

۴- با افزایش نسبت فاصله پایه‌ها به قطر آنها مقدار خطا در محاسبات آبستکی کمتر است و با کاهش این پارامتر این مقدار خطا بیشتر می‌شود.

پیشنهادات

۱- گروه پایه مورد بررسی در این تحقیق با پایه‌های مدور بوده و بهتر است برای پایه‌های کج و یا پایه‌های با هندسه غیر مدور نیز بررسی گردد.

منابع

1. Breusers, H. N. C., Nicollet, G., (1977), and Shen, H. W., "Local scour around cylindrical piers", J. Hyd. Res., V. 15, No. 3, pp. 211-252.
۲. ادیبیان، ح، حیدر پور، م و افضل‌ی مهر، ح، (۱۳۸۳)، "آبستکی موضعی در اطراف گروه پایه‌های استوانه‌ای شکل و بررسی عوامل موثر بر آن" ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
3. Hannah, C. R., (1978), "Scour at pile groups", University of Canterbury, N. Z., Civil Eng. Research Rep. No. 78.
۴. غضنفری هاشمی، س.، (۱۳۸۸)، پیش بینی عمق آبستکی اطراف پایه پیل با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز
۵. بهشتی، ع.، (۱۳۸۳)، آبستکی در شرایط آب صاف در اطراف گروه پایه، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، NCCE 1383 اردیبهشت ماه، دانشگاه صنعتی شریف کد مقاله ۸۳، ۲-۱۸۱۹.
6. Thamer.A.M, MegatJohari.M, Ghazali.A.H, Huat .B.K, (2005), "Validation of some bridge pier scour formulae using field data and labratoty data", American Journal of Environmental.