

الحمد لله
البرحمين



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

گروه عمران

مدلسازی آب شستگی موضعی گروه پایه های پل با شکل های هندسی مختلف

دانشجو :

امیر اظهري

استاد راهنما :

دکتر سيد فضل الله ساغرواني

استاد مشاور:

دکتر احمد احمدي

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

تیر ۱۳۹۰

در ابتدا لازم است از همه عزیزانی که مرا در تهیه این رساله کمک، همراهی و تشویق نمودند، قدردانی نمایم. اول از همه از استاد فرهیخته و بسیار عزیزم جناب آقای دکتر سید فضل الله ساغروانی به دلیل راهنماییهای ارزشمند، نظرات سازنده و صبر و حمایت در طول دوره تحقیقاتی که مانند پدری دانشمند، مهربان و دلسوز مرا یاری نمودند، سپاسگذاری نمایم. همچنین از حمایت ها و تشویق های ارزشمند خانواده ام بخصوص پدر و مادر عزیزم تشکر می نمایم. در نهایت این اثر را به همسر مهربان و فداکار خود رزا زیادخانی تقدیم نموده و از خانواده عزیزش قدردانی می کنم.

لازم به ذکر است کلیه مطالب مندرج در این رساله نتایج تحقیقات اینجانب امیر اظهري در طول دوره تحقیقاتی می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگر محققان مرجع مربوطه ذکر گردیده است.

همچنین کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

تیر ماه سال ۱۳۹۰

چکیده :

مطالعه ای بر روی آب شستگی موضعی گروه پایه های پل با هدف توسعه روش های طراحی و بهبود معادلات پیش بینی کننده عمق آب شستگی در گروه پایه ها انجام شد. مجموعه ای از آزمایشات در شرایط جریان پایدار بر روی گروه پایه های سه تایی صورت گرفت. تمامی آزمایشات در شرایط آب زلال انجام شد.

پارامترهای حاکم بر پدیده آب شستگی موضعی اطراف گروه پایه های پل عبارتند از: ویژگی های جریان، مشخصات رسوب و شکل و اندازه پایه ها. اثرات این پارامترها بر روی عمق بیشینه آب شستگی موضعی برای یک تک پایه در گذشته به شکل کاملی مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه هنگامی که معیارهای طراحی پایه های تکی به طور مستقیم به گروه پایه ها اعمال می شود، اثرات مهم گروه پایه ها شامل اثرات محافظتی، اثرات تقویتی و اثرات گردابه های نعل اسبی تشدید شونده نادیده گرفته می شود. علاوه بر آن، اثرات گروه پایه با تغییر در فاصله بین پایه ها (G) تغییر می کند.

ابتدا آب شستگی موضعی بر روی تک پایه با سه قطر متفاوت انجام شد (۶، ۸ و ۱۰ سانتیمتر). با استفاده از روابط طراحی معتبر برای تک پایه ها نظیر گروه پایه های سه تایی با تغییر در فواصل بین پایه ها مورد بررسی قرار گرفتند. در مورد این پایه های قرار گرفته در راستای جریان، پایه های پایین دست بوسیله پایه های بالادست محافظت می شوند و باعث کاهش عمق آب شستگی موضعی اطراف پایه های پایین دست می شود. همچنین اثرات تقویتی در پایه جلویی بسیار مهم است و باعث می شود که عمق آب شستگی موضعی در این پایه نسبت به تک پایه بیشتر گردد. علاوه بر آن، عمق آب شستگی موضعی در پایه های پایین دست، که از مقدار متناظر در تک پایه ها کمتر است، با افزایش فاصله نسبی بین پایه ها تغییر می کند. گردابه نعل اسبی تشدید شونده هنگامیکه پایه ها در یک راستا قرار گرفته باشند و فاصله نسبی بین پایه ها از ۵ کمتر باشد، بر عمق آب شستگی موضعی تأثیر به سزایی دارد. در

این محدوده از فاصله نسبی، گردابه نعل اسبی تشدید می شود و گودال آب شستگی موضعی عمیق تر می گردد. اگرچه با افزایش مقدار فاصله نسبی بین پایه ها این اثر کم رنگ می گردد.

داده های بدست آمده در مورد گروه پایه ها با استفاده از مدل رگرسیون چندگانه مورد تحلیل قرار گرفتند تا رابطه ای برای پیش بینی عمق آب شستگی موضعی در پایه جلویی ایجاد شود. این مدل رگرسیونی شامل یک پارامتر بی بعد (G/d) مربوط به اثرات گروه پایه می باشد. نتایج نشان دادند که با جایگزینی مقدار (u/u_c) یا عدد فرود به جای (u/u_c) در رابطه پیشنهادی شپارد و همکارانش در سال ۲۰۰۴، دقت این رابطه افزایش می یابد. رابطه پیشنهادی تخمین مناسبتر و منطقی تری دارد. علاوه بر آن، روابط پیشنهادی در این تحقیق نتایج مناسبتری برای تک پایه ها در مقایسه با روابط ملویل و چیو در سال ۱۹۹۷، اتما در سال ۱۹۹۹، ریچاردسون و دیویس در سال ۲۰۰۱ و شپارد در سال ۲۰۰۴ دارد.

در انتها نیز یک مدل سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی به منظور شبیه سازی آب شستگی موضعی در آب زلال اطراف پایه های دایره ای مورد استفاده قرار گرفت. این مدل عددی فرض می کند که جریان حاوی رسوب مانند یک جریان دوفازی عمل می کند و از معادلات بسته مدل آشفستگی کی - اپسیلون برای پیش بینی پارامترهای آشفستگی در فاز مایع استفاده می کند. محدوده جریان دوفازی (آب در کانال با یک ناحیه ماسه ای در بستر کانال) با استفاده از فرمول بندی چندفازی فلوئنت حل می شود که روش اوپلرین در حل عمق آب شستگی موضعی اطراف گروه پایه ها نامیده می شود. در این تحقیق یک مدل آشفستگی کی - اپسیلون که با استفاده از عبارات اضافی تکمیلی و در برگیرنده انتقال مومنتوم آشفته بین فازی است، برای پیش بینی مقادیر آشفستگی در فاز مایع به کار گرفته می شود. سطح مشترک بین آب و ماسه در مطالعات آزمایشگاهی به عنوان مقدار متناظر با کسر حجمی ماسه ۰/۵ در مطالعات عددی انتخاب شد. تطابق خوب موجود بین نتایج شبیه سازی عددی و داده های آزمایشگاهی قابلیت اعتبار این مدل عددی را نشان میدهد.

لیست مقالات مستخرج از رساله:

۱. چاپ مقاله با عنوان :

“Simulation of clear water local scour around the group of bridge piers using an Eulerian 3-D, two-phase model”, Journal of Progress in Computational Fluid Dynamics, Aprill 2011.

۲. چاپ مقاله با عنوان :

“Numerical Study of Local Scour around Bridge Pier Groups ”

در هجدهمین کنفرانس بین المللی روش های عددی در مهندسی آب، بارسلون اسپانیا،
(21-24 July 2010)

۳. چاپ مقاله با عنوان “مدلسازی عددی آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه پل با مقطع

دایره ای” در نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۸ الی ۲۰ آبان ۱۳۸۹، دانشگاه تربیت مدرس

۴. چاپ مقاله با عنوان “مطالعه آزمایشگاهی آب شستگی گروه پایه های پل ” ، اولین

کنفرانس منطقه ای عمران، دانشگاه آزاد قائمشهر، اردیبهشت ۱۳۹۰

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و کلیات.....	۱
۱-۱- معرفی مسأله.....	۲
۲-۱- نیازهای تحقیقاتی.....	۶
۳-۱- اهداف و چشم انداز طرح.....	۹
۴-۱- برنامه تحقیقاتی.....	۱۰
۵-۱- ارزیابی نتایج.....	۱۱
۶-۱- تجهیزات آزمایشگاهی.....	۱۲
۷-۱- مشخصات رساله.....	۱۳
فصل ۲- تاریخچه مطالعات انجام شده.....	۱۴
۱-۲- روش طراحی.....	۱۵
۲-۲- آب شستگی در محل پل ها.....	۱۵
۱-۲-۲- آب شستگی عمومی.....	۱۶
۲-۲-۲- آب شستگی انقباضی.....	۱۷
۳-۲-۲- آب شستگی موضعی.....	۱۹
۱-۳-۲-۲- خصوصیات جریان اطراف یک پایه پل.....	۲۰
۱-۳-۲-۲- اندازه و نیروی جریانات چرخشی.....	
۲-۳-۲-۲- فرکانس جریانهای چرخشی دور شونده.....	۲۶
۲-۳-۲-۲- آب شستگی موضعی اطراف گروه پایه های پل.....	۳۰
۳-۲- روش های تحلیلی.....	۳۷
۴-۲- تحقیقات آزمایشگاهی.....	۵۰
۱-۴-۲- مقدمه.....	۵۰
۲-۴-۲- تحلیل ابعادی.....	۵۱
۳-۴-۲- اندازه گیری های آزمایشگاهی.....	۵۳
۱-۳-۴-۲- تأثیر شکل پایه پل.....	۵۳
۲-۳-۴-۲- تأثیر عمق جریان.....	۵۳

۵۴	 تأثیر شدت جریان ۳-۳-۴-۲
۵۵	 تأثیر اندازه نسبی دانه های رسوب و توزیع دانه ها ۴-۳-۴-۲
۵۶	 تأثیر زاویه هجوم جریان ۵-۳-۴-۲
۵۷	 تأثیر عدد رینولدز پایه پل ۶-۳-۴-۲
۵۹	 تأثیر عدد فرود پایه پل ۷-۳-۴-۲
۶۰	 توسعه زمانی عمق آب شستگی موضعی ۸-۳-۴-۲
۶۸	 اثرات مقیاس در نتایج آزمایشگاهی ۴-۴-۲
۷۱	 پیشرفت های مدل سازی های عددی ۵-۲
۷۷	 مطالعات و مشاهدات میدانی ۶-۲
۸۱	فصل سوم : کانال آزمایشگاهی، تجهیزات و روش انجام آزمایشات
۸۲	 مقدمه ۱-۳
۸۳	 اجزای کانال فیزیکی ۲-۳
۸۵	 سیستم تأمین آب ۱-۲-۳
۸۵	 مخزن آب ۱-۱-۲-۳
۸۶	 سیستم پمپاژ ۲-۱-۲-۳
۸۶	 مخزن تأمین ارتفاع ۳-۱-۲-۳
۸۷	 صافی های جریان ۴-۱-۲-۳
۸۸	 کانال ها ۲-۲-۳
۸۸	 کانال اصلی ۱-۲-۲-۳
۹۰	 حوضچه رسوبگیری ۲-۲-۲-۳
۹۰	 کانال برگشت آب ۳-۲-۲-۳
۹۱	 تجهیزات اندازه گیری ۳-۳
۹۱	 اندازه گیری نرخ جریان ۱-۳-۳
۹۲	 اندازه گیری سرعت جریان ۲-۳-۳
۹۲	 دستگاه سرعت سنج الکترو مغناطیسی ۱-۲-۲-۳
۹۴	 دستگاه سرعت سنج صوتی داپلری (ADV) ۲-۲-۲-۳

۳-۳-۳- برداشت توپوگرافی بستر	۹۵
۳-۳-۴- اندازه گیری عمق جریان	۹۶
۳-۴- رسوبات بستر	۹۷
۳-۵- مشخصات گروه پایه ها	۹۹
۳-۶- نحوه انجام آزمایش ها و آنالیز داده ها	۹۹
فصل چهارم : بررسی آزمایشگاهی آب شستگی موضعی اطراف گروه پایه های سه تایی..... ۱۰۵	
۴-۱- مقدمه	۱۰۶
۴-۲- آزمایشات انجام شده	۱۰۶
۴-۳- توسعه زمانی آب شستگی موضعی گروه پایه ها	۱۰۸
۴-۴- اثرات تغییرات قطر پایه ها روی آب شستگی موضعی	۱۱۵
۴-۵- اثرات تغییرات نرخ جریان روی آب شستگی موضعی	۱۱۹
۴-۶- اثرات تغییرات اندازه میانگین ذرات روی آب شستگی موضعی	۱۲۰
۴-۷- اثرات تغییرات فاصله نسبی بین پایه ها روی آب شستگی موضعی	۱۲۳
۴-۸- منحنی های میزان آب شستگی موضعی گروه پایه های پل	۱۳۰
۴-۹- اثرات تغییرات شکل پایه ها روی آب شستگی موضعی	۱۳۷
۴-۱۰- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با تعدادی از روابط معتبر کنونی	۱۳۹
۴-۱۰-۱- مقدمه	۱۳۹
۴-۱۰-۲- پارامترهای مؤثر بر عمق آبشستگی موضعی	۱۳۹
۴-۱۰-۳- تخمین حداکثر عمق آبشستگی موضعی در پایه های منفرد	۱۴۲
۴-۱۰-۳-۱- رابطه ملویل	۱۴۳
۴-۱۰-۳-۲- رابطه اتما و همکارانش	۱۴۵
۴-۱۰-۳-۳- رابطه ریچاردسون و دیویس	۱۴۵
۴-۱۰-۳-۴- رابطه شپارد	۱۴۷
۴-۱۰-۳-۵- رابطه ارائه شده در این تحقیق (رابطه شپارد اصلاح شده) و ارزیابی آن	۱۴۷
۴-۱۰-۴- بررسی عملکرد رابطه ارائه شده در پیش بینی حداکثر عمق آبشستگی	۱۵۲
۴-۱۰-۵- ارزیابی صحت رابطه ارائه شده	۱۵۴

فصل پنجم: مدل سازی عددی آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه پل با مقطع دایره‌ای ۱۵۶

- ۱-۵- مقدمه ۱۵۷
- ۲-۵- معرفی کلی نرم افزار فلوئنت ۱۶۱
- ۳-۵- شرایط مرزی ۱۶۳
- ۴-۵- روش حل مسائل چندفازی اوپلری در نرم افزار فلوئنت ۱۶۳
- ۵-۵- مدل عددی دوفازی اوپلرین ۱۶۴
- ۱-۵-۵- معادلات حاکم ۱۶۵
- ۲-۵-۵- ضریب تبادل بین فازی ۱۶۶
- ۶-۵- مدل آشفستگی مورد استفاده برای فازها ۱۶۷
- ۷-۵- مدل آزمایشگاهی ۱۷۰
- ۸-۵- شبیه‌سازی عددی با فلوئنت ۱۷۰
- ۹-۵- نتایج و بحث ۱۷۳
- ۱-۹-۵- حداکثر عمق آبشستگی ۱۷۳
- ۲-۹-۵- توسعه زمانی عمق آبشستگی ۱۷۶
- ۳-۹-۵- سطح مشترک بین ماسه و آب ۱۷۹
- ۴-۹-۵- سطح آب ۱۸۱
- ۵-۹-۵- میدان جریان در اطراف پایه‌ها ۱۸۲
- ۱۰-۵- نتیجه‌گیری ۱۸۸

فصل ششم: نتایج و پیشنهادها ۱۹۲

- ۱-۶- خلاصه تحقیق ۱۹۳
- ۲-۶- نتایج تحقیق ۱۹۳
- ۳-۶- پیشنهادها آتی ۱۹۷
- پیوست (۱) محاسبه شرایط اولیه حرکت رسوبات در حالت های مختلف آزمایشگاهی ۲۰۱
- پیوست (۲) آنالیز ابعادی ۲۰۳
- پیوست (۳) چگونگی انتخاب زمان تعادل آب شستگی موضعی ۲۱۰

فهرست جداول

جدول (۱-۲). فاکتورهای شکل برای پایه های پل و نیم پایه ها ۵۴

جدول (۲-۲).	فاکتور های زاویه جریان K_θ برای یک پایه از پل	۵۷
جدول (۳-۲).	مقدار ضرایب K_1 و K_2 در معادله ۲-۴۸	۶۴
جدول (۱-۳).	مقادیر متناظر نرخ جریان با توجه به مقادیر کالیبره شده تراز سنج نقطه ای	۹۱
جدول (۲-۳).	مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح بستر	۹۸
جدول (۱-۴).	آزمایشات انجام شده با استفاده از مصالح نوع اول	۱۰۷
جدول (۲-۴).	آزمایشات انجام شده با دو نوع متفاوت دیگر مصالح	۱۰۷
جدول (۳-۴).	آزمایش برای بررسی اثرات فاصله گروه پایه ها	۱۰۸
جدول (۴-۴).	مقادیر حداکثر عمق آب شستگی مقابل پایه جلویی در تعدادی از آزمایشات برای	
	$d_{50} = 1.31 \text{ mm}$ و $G = 25 \text{ cm}$	۱۲۶
جدول (۵-۴).	مقادیر ماکزیمم عمق آب شستگی موضعی در آزمایشات تک پایه (d_{ss}) با $d_{50} = 1.31$	
	mm	
(a	مقطع دایره ای ، b) مقطع مربعی	۱۲۷
جدول (۶-۴).	مقادیر ماکزیمم عمق آب شستگی موضعی پایه های جلویی، میانی و انتهایی در	
	آزمایشات گروه پایه با فاصله آزاد برابر ۲۵ سانتیمتر و $d_{50} = 1.31 \text{ mm}$: a) مقطع دایره ای ، b)	
	مقطع مربعی	۱۲۷
جدول (۷-۴).	مقادیر نمایی m در فرمول $d_{max} = \sigma_g^m d_{50}$	۱۴۴
جدول (۸-۴).	ضریب تصحیح شکل دماغه پایه (K_s)	۱۴۴
جدول (۹-۴).	ضریب تصحیح زاویه برای پایه با دماغه مربعی شکل (K_θ)	۱۴۴
جدول (۱۰-۴).	ضریب تصحیح شکل بستر ، K_b	۱۴۶
جدول (۱۱-۴).	ضریب تصحیح اثر پوشش بستر ، K_a بوسیله d_{90}	۱۴۶
جدول (۱-۵).	خلاصه شرایط و داده های آزمایشگاهی	۱۷۰
جدول پ-۱-۱.	روش محاسبه مقدار سرعت آستانه حرکت رسوبات در شرایط مختلف آزمایشگاهی	۲۰۲
جدول (پ-۱-۲).	ابعاد و کمیت های مورد استفاده در آب شستگی موضعی	۲۰۶
جدول پ-۱-۳.	مشخصات آزمایش ها ی بلند مدت ۳۶ ساعته و نتایج آن	۲۱۱

فهرست شکل ها و نمودارها

- شکل (۱-۲). انقباض در کانال جریان ۱۸
- شکل (۲-۲). ساختار جریان و گودال آب شستگی موضعی حول یک پایه پل سیلندری شکل به صورت شماتیک ۲۱
- شکل (۳-۲). شکل شماتیک یک گردابه ۲۳
- شکل (۴-۲). مکانیسم جریان چرخشی دور شونده پشت یک پایه پل ۲۷
- شکل (۵-۲). تغییرات عدد اشتروال نسبت به عدد رینولدز برای یک استوانه چهار گوش ۲۸
- شکل (۶-۲). نتایج آزمایشگاهی جابرت و انگلدینگر در سال ۱۹۵۶ و نتایج معادله ریاضی کارستنز در سال ۱۹۶۶ برای آب شستگی پایه پل ۳۳
- شکل (۷-۲). چگونگی تعریف طرح پیشنهادی سوزوکی و ناکاگوا جهت تحلیل ۳۵
- شکل (۸-۲). ضریب زاویه جریان برای پایه های ناهمراستا با جریان ۴۴
- شکل (۹-۲). اثر شدت جریان در عمق آب شستگی نسبی یک پایه سیلندری شکل با مصالح یکنواخت ۵۵
- شکل (۱۰-۲). فاصله جدا شدگی در بالادست خط مرکزی پایه بر اساس نتایج محققین ۵۸
- شکل (۱۱-۲). عمق تعادل آب شستگی و عدد فروود پایه ۵۹
- شکل (۱۲-۲). چگونگی تغییرات زمانی در عمق آب شستگی ۶۱
- شکل (۱۳-۲). نمودار تغییرات عمق آب شستگی با زمان، $u^*/u_{*c} = 0.90$ ، $30 < b/d_{50} < 130$ ۶۵
- شکل (۱-۳). نمای کلی مدل آزمایشگاهی ۸۴
- شکل (۲-۳). اجزای مدل آزمایشگاهی ۸۴
- شکل (۳-۳). مخزن آب سالن آزمایشگاهی رودخانه در موسسه تحقیقات آب: (الف) نمای داخلی مخزن، (ب) نمای خروجی های مخزن به پمپ ها ۸۵
- شکل (۴-۳). مخزن تأمین ارتفاع: (الف) در حالت تخلیه دبی مازاد، (ب) در حالت تخلیه، (ج) شیر اصلی و (د) لوله انتقال ۸۷
- شکل (۵-۳). نمائی از شبکه صافی در ورودی جریان به کانال اصلی ۸۸
- شکل (۶-۳). شیرهای کنترل جریان: (الف) شیرهای پروانه ای تنظیم دبی در بالادست، (ب) شیر تخلیه برای تنظیم جزئی نرخ جریان در بالادست ۸۹

- شکل (۷-۳). حوضچه رسوبگیر و کانال برگشتی: الف) حوضچه رسوبگیر اولیه، ب) کانال برگشتی جریان
- کانال اصلی به مخزن ۹۰
- شکل (۸-۳). وسایل اندازه گیری نرخ جریان: الف) سرریز مستطیلی مستقر در کانال، ب) تراز سنج نقطه
- ای (لیمینیمتر) ۹۲
- شکل (۹-۳). دستگاه سرعت سنج الکترومغناطیسی (Valeport 801 ساخت انگلستان) ۹۳
- شکل (۱۰-۳). اجزای تشکیل دهنده دستگاه ADV ۹۴
- شکل (۱۱-۳). نمایی از دستگاه ADV و دستگاه Bed Profiler مستقر در کانال آزمایشگاهی ۹۶
- شکل (۱۲-۳). وسیله اندازه گیری نقطه ای ۹۷
- شکل (۱۳-۳). دانه بندی مصالح بستر ۹۸
- شکل (۱۴-۳). شماتیک گروه پایه استفاده شده در آزمایش ها ۹۹
- شکل (۱۵-۳). بستر مسطح شده کانال و نحوه تسطیح بستر: الف) کانال تسطیح شده، ب) نحوه تسطیح ۱۰۰
- شکل (۱۶-۳). لوله سیفونی پایین دست کانال: الف) شیر لوله سیفونی، ب) لوله سیفونی شکل جهت
- پر کردن کانال از پایین دست به شکل بسیار آرام، ج) روند پر کردن کانال از پایین دست ۱۰۲
- نمودار (۱-۴). تغییرات عمق آب شستگی موضعی مقابل پایه جلویی گروه پایه با مقطع دایره ای به قطر
- : (a) ۶، (b) ۸ و (c) ۱۰ سانتیمتر ۱۰۹
- نمودار (۲-۴). تغییرات عمق آب شستگی موضعی مقابل پایه جلویی گروه پایه با مقطع مربعی به عرض
- (a) ۶، (b) ۸ و (c) ۱۰ سانتیمتر ۱۱۰
- نمودار (۳-۴). مقایسه روند توسعه زمانی گسترش عمق آب شستگی موضعی مقابل پایه جلویی بین
- گروه پایه دایره ای و مربعی در تعدادی از آزمایشات: (a) نرخ جریان ۶۵ لیتر بر ثانیه و قطر (یا عرض) پایه
- ۶ سانتیمتر، (b) نرخ جریان ۵۰ لیتر بر ثانیه و قطر (یا عرض) پایه ۸ سانتیمتر و (c) نرخ جریان ۸۰
- لیتر بر ثانیه و قطر (یا عرض) پایه ۱۰ سانتیمتر ۱۱۱
- نمودار (۴-۴). نمودار توسعه زمانی بی بعد شده در تعدادی از آزمایشات ۱۱۳
- نمودار (۵-۴). نمودار توسعه زمانی با مقیاس لگاریتمی در تعدادی از آزمایشات ۱۱۵
- نمودار (۶-۴). نمودار توسعه زمانی مقادیر عمق آب شستگی موضعی مقابل پایه جلویی پایه با مقطع
- دایره ای و نرخ جریان برابر با: (a) ۵۰، (b) ۶۵ و (c) ۸۰ لیتر بر ثانیه ۱۱۷

- نمودار (۷-۴). نمودار توسعه زمانی مقادیر عمق آب شستگی موضعی مقابل پایه جلویی پایه با مقطع مربعی و نرخ جریان برابر با : (a) ۵۰ ، (b) ۶۵ و (c) ۸۰ لیتر بر ثانیه ۱۱۹
- نمودار (۸-۴). توسعه زمانی عمق آب شستگی موضعی گروه پایه با مقطع دایره ای برای نرخ جریان ۵۰ لیتر بر ثانیه و قطر پایه ۸ سانتیمتر و اندازه های متفاوت ذرات رسوب ۱۲۱
- نمودار (۹-۴). توسعه زمانی عمق آب شستگی موضعی گروه پایه با مقطع دایره ای برای نرخ جریان ۸۰ لیتر بر ثانیه و قطر پایه ۸ سانتیمتر و اندازه های متفاوت ذرات رسوب ۱۲۲
- نمودار (۱۰-۴). توسعه زمانی عمق آب شستگی موضعی گروه پایه با مقطع دایره ای برای نرخ جریان ۵۰ لیتر بر ثانیه و قطر پایه ۱۰ سانتیمتر و اندازه های متفاوت ذرات رسوب ۱۲۲
- نمودار (۱۱-۴). اثر فاصله بین پایه ها در گروه پایه سه تایی بر عمق آبشستگی موضعی نسبی در جلوی پایه اول در آزمایشات گروه پایه های سیلندری با $d_{50} = 1.31 \text{ mm}$ ۱۲۴
- نمودار (۱۲-۴). اثر تغییرات فاصله بین پایه ها در گروه پایه سه تایی بر عمق آبشستگی موضعی نسبی در جلوی
- پایه های میانی و انتهایی در آزمایشات گروه پایه های سیلندری : (a) $D=6 \text{ cm} \ \& \ Q=50\text{lit/s}$ و (b) $d_{50}=1.31 \text{ mm}$ ، $D=10 \text{ cm} \ \& \ Q=50\text{lit/s}$ و (c) $d_{50}=1.31 \text{ mm}$ ، $Q=65\text{lit/s}$ ۱۲۶
- نمودار (۱۳-۴). توسعه زمانی آب شستگی موضعی مقابل پایه جلویی به قطر ۶ سانتیمتر و نرخ جریان ۵۰ لیتر بر ثانیه در پایه های با مقطع دایره ای ۱۲۸
- نمودار (۱۴-۴). توسعه زمانی آب شستگی موضعی مقابل پایه جلویی به قطر ۶ سانتیمتر و نرخ جریان ۶۵ لیتر بر ثانیه در پایه های با مقطع دایره ای ۱۲۹
- نمودار (۱۵-۴). توسعه زمانی آب شستگی موضعی مقابل پایه جلویی به قطر ۱۰ سانتیمتر و نرخ جریان
- ۶۵ لیتر بر ثانیه در پایه ها با مقطع دایره ای ۱۲۹
- نمودار (۱۶-۴). منحنی های میزان آب شستگی موضعی در تعدادی از آزمایشات با مقطع دایره ای و مربعی در
- زمان های ۱۵ و ۳۶۰ دقیقه ۱۳۶
- نمودار (۱۷-۴). توسعه زمانی آب شستگی موضعی برای نرخ جریان ۶۵ لیتر بر ثانیه و قطر ۶ سانتیمتر ۱۳۸

نمودار (۴-۱۸). عمق تعادل نسبی پایه مربعی به دایره ای به ترتیب برای قطرهای ۶، ۸ و ۱۰ سانتیمتر

از چپ به راست ۱۳۸

نمودار (۴-۱۹). ارزیابی عملکرد رابطه ارائه شده و رابطه شپارد ۲۰۰۴ با نتایج آزمایشگاهی شپارد ۱۹۹۵.... ۱۴۹

شکل (۴-۲۰). مقایسه عمق آبشستگی اندازه گیری شده در تعدادی از آزمایشات و نتایج محاسبه شده

توسط

تعدادی از روابط مشهور برای گروه پایه دایره ای ۱۵۱

شکل (۴-۲۱). مقایسه عمق آبشستگی اندازه گیری شده در تعدادی از آزمایشات و نتایج محاسبه شده

توسط

تعدادی از روابط مشهور برای گروه پایه مربعی ۱۵۱

شکل (۴-۲۲). مقایسه عمق آبشستگی اندازه گیری شده در تعدادی از آزمایشات و نتایج محاسبه شده

توسط

تعدادی از روابط مشهور و رابطه شپارد اصلاح شده در این تحقیق برای گروه پایه دایره ای ۱۵۳

شکل ۴-۲۳ مقایسه عمق آبشستگی اندازه گیری شده در تعدادی از آزمایشات و نتایج محاسبه شده

توسط

تعدادی از روابط مشهور و رابطه شپارد اصلاح شده برای گروه پایه مربعی ۱۵۴

شکل (۴-۲۴). ارزیابی عملکرد رابطه ارائه شده در این تحقیق در مقایسه با داده های آزمایشگاهی شپارد

(۱۹۹۵) ۱۵۵

شکل (۴-۲۵). ارزیابی عملکرد رابطه ارائه شده در این تحقیق در مقایسه با داده های آزمایشگاهی یانماز

و

آلتینبیلک (۱۹۹۱) ۱۵۵

شکل (۵-۱). شبکه محاسباتی سه بعدی برای شبیه سازی عددی آبشستگی ۱۷۲

شکل (۵-۲). خطوط همتراز عمق آبشستگی (بر حسب سانتی متر) پس از ۱۵ و ۳۶۰ دقیقه در (a) :

مدل فیزیکی و (b) : عددی ۱۷۵

شکل (۵-۳). مقایسه عمق آبشستگی اندازه گیری شده و محاسبه شده در زمان ۱۵ و ۳۶۰ دقیقه ۱۷۶

شکل (۵-۴). نمودار توسعه زمانی آبشستگی گروه پایه در مقایسه با تک پایه با استفاده از نتایج

آزمایشگاهی در حالات مختلف ترسیمی ۱۷۸

- شکل (۵-۵). مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی توسعه زمانی آبستگی موضعی در (a). پایه اول ، (b).
- پایه میانی و (c). پایه پشتی ۱۷۹
- شکل (۵-۶). الگوی انتقال رسوب روی بستر مسطح ۱۸۰
- شکل (۵-۷). مقایسه پروفیل‌های $\alpha_s = 0.5$ و شدت آشفستگی صفر در صفحه عمودی متقارن در زمان $T=360 \text{ min}$ ۱۸۱
- شکل ۵-۸- ضریب فشار محاسبه شده در مدل عددی ۱۸۲
- شکل ۵-۹- تغییرات سطح آب در مدل عددی همراه با نتایج آزمایشگاهی ۱۸۲
- شکل (۵-۱۰). نحوه استقرار پایه ها و جهت جریان ۱۸۳
- شکل (۵-۱۱): بردارهای سرعت در سطح آب ۱۸۴
- شکل (۵-۱۲). بردارهای سرعت در سطح مشترک اولیه آب و ماسه ۱۸۵
- شکل (۵-۱۳). مقادیر افقی سرعت جریان در موقعیت‌های مختلف بالادست هر یک از پایه‌ها، (a) پایه جلویی، (b) پایه میانی و (c) پایه عقبی ۱۸۶
- شکل (۵-۱۴). مقادیر قائم سرعت جریان در موقعیت‌های مختلف بالادست هر یک از پایه‌ها، (a) پایه جلویی، (b) پایه میانی و (c) پایه عقبی ۱۸۷
- شکل (۵-۱۵). سرعت محوری در ۵ سانتیمتری بالادست پایه جلویی ۱۸۷
- شکل (۵-۱۶). سرعت قائم در ۵ سانتیمتری بالادست پایه جلویی ۱۸۸

فهرست علائم

A	سطح مقطع عرضی
B	عرض کانال
B	عرض پایه پل
C	ضریب شزی
CCHE3D	مدل هیدرودینامیکی سه بعدی انتقال رسوب
C_D	ضریب پسا
C_L	ضریب برا
C_0	ضریب بی بعد شزی
C_p	ضریب فشار
C_V	ضریب جرم اضافه شده
d_s	قطر ذرات فاز ماسه
d_{se}	عمق تعادل بیشینه آب شستگی
d_{sF}	عمق تعادل آب شستگی جلوی پایه جلویی
d_{ss}	عمق تعادل آب شستگی جلوی تک پایه
d_{50}	متوسط اندازه دانه های رسوبات
d^*	قطر بی بعد شده رسوبات
$\frac{d}{dt}(d_s)$	نرخ اولیه آب شستگی
$\dot{d}_i$	نرخ آب شستگی اولیه
D_v	قطر گردابه نعل اسبی
f	فرکانس نوسانات
f_v	فرکانس چرخش در هسته گردابه
Fr_b	عدد فرود پایه پل
g	شتاب ثقل
$\vec{g}$	بردار شتاب ثقل
g'	شتاب ثقل کاهش یافته
G	فاصله محور مرکزی پایه از یکدیگر
G/D	پارامتر فاصله نسبی بین پایه ها
$G_{k,w}$	تولید انرژی جنبشی آشغته
H	ارتفاع میانگین کف
K_a	ضریب تصحیح پوشش بستر بوسیله مصالح دانه ای
K_b	ضریب تصحیح شکل بستر
K_d	ضریب نسبت اندازه رسوبات

K_L	ضریب شدت جریان
K_s	فاکتور شکل
K_s	ضریب تجربی آزمایشگاهی وابسته به اندازه دانه های رسوب
k_{sw}	کوواریانس سرعت های فاز سیال
$K_{s,w}$	ضریب تبادل بین فاز
k_w	انرژی جنبشی آشفته
K_θ	ضریب زاویه هجوم جریان نزدیک شونده
L_r	مقیاس هندسی
l/b	نسبت طول به عرض پایه
n	ضریب زبری مانینگ
N	فاکتور شکل
N_s	عدد رسوب
N_{sc}	مقدار عدد رسوب در حالت آستانه انتقال رسوب صفر
p	فشار مشترک بین دو فاز
p_d	احتمال سقوط ذره به روی بستر و رسیدن به سکون پس از حرکت به اندازه طول گام λ
p_s	عنوان احتمال حرکت یک ذره روی بستر در یک ثانیه
p_s	فشار ذرات جامد
P_x	فشار استاتیک موضعی در موقعیت X
P_0	فشار استاتیک غیر آشفته بالادست
q_t	نرخ جریان رسوبات در واحد عرض
q_x	دبی انتقال رسوب در جهت X
q_y	دبی انتقال رسوب در جهت Y
Q	نرخ جریان
Q_c	نرخ جریان آب در کانال اصلی
Q_f	نرخ جریان آب در سیلاب دشت
Q_s	نرخ جریان رسوبات
Q_{si}	تابع ورودی انتقال رسوب
Q_{so}	تابع خروجی انتقال رسوب
$Q_s(in)$	نرخ انتقال رسوبات به داخل گودال آب شستگی
$Q_s(out)$	نرخ انتقال رسوبات به خارج از گودال آب شستگی
F_0	شعاع جریان چرخشی نعل اسبی روی بستر مسطح (شعاع هسته جریان)
R	شعاع چرخش گردابه نعل اسبی
Re_b	عدد رینولدز پایه
SG	وزن مخصوص نسبی ذره

St	عدد اشتروهال
STC	محاسبه ظرفیت انتقال رسوب
T_{eq}	زمان لازم برای رسیدن به عمق تعادل آب شستگی
T_0	نیروی جریان روی بستر مسطح (نیروی گردابه اولیه)
U	سرعت میانگین جریان
u_b	سرعت متوسط در سطح بستر
U_c	سرعت میانگین متناظر با آغاز آب شستگی پایه پل
$\vec{U}_w$	سرعت وزنی فاز سیال
u_0	سرعت سطحی جریان نزدیک شونده
u_0	سرعت مرجع گردابه
u^*	سرعت برشی
u^*_c	سرعت برشی بحرانی
$\frac{u}{u_c}$	شدت جریان
$\frac{u}{\hat{u}_c}$	شدت جریان ساختگی
V_a	سرعت جریان روی بستر
V_c	سرعت میانگین آغاز حرکت رسوبات بالادست
V_{ca}	سرعت بحرانی در بزرگترین اندازه دانه
V_q	مقدار سرعت در فاز مورد نظر
$\vec{V}_r$	مقدار میانگین سرعت نسبی موضعی بین سرعت متوسط ذره و سرعت نسبی متوسط
$\vec{V}_s$	سرعت متوسط جریان برای ماسه
$\vec{V}_w$	سرعت متوسط جریان برای آب
V_θ	سرعت مماسی چرخشی نعل اسبی
$V_{\theta c}$	بیشینه سرعت مماسی در گردابه
V_1	سرعت جریان نزدیک شونده
W_f	سرعت سقوط ذرات
x_s/b	فاصله بی بعد شده نقطه جدشدگی بالادست خط مرکزی پایه توسط عرض پایه پل
y_1	عمق جریان نزدیک شونده
y_{01}	عمق جریان یکنواخت در بالادست
y_{02}	عمق جریان یکنواخت در پایین دست
z	ارتفاع بستر بالاتر از مبنا
α	شیب بستر
α_w	کسر حجمی آب
α_s	کسر حجمی ماسه
ε	زاویه ایستایی گوشه های گودال آب شستگی

ε	نرخ جابجایی ذرات به خارج گودال آب شستگی
ε_w	نرخ اضمحلال انرژی جنبشی
γ	وزن مخصوص جریان
γ_s	وزن مخصوص ذره
λ_w	مقدار تخلخل بستر
κ	ثابت فان کارمان
μ	ویسکوزیته دینامیکی سیال (آب)
$\mu_{t,w}$	ویسکوزیته آشفته
μ_w	لزجت دینامیکی سیال (آب)
ρ	جرم مخصوص سیال (آب)،
ρ_s	جرم مخصوص رسوبات بستر
ρ_w	جرم مخصوص آب
$\emptyset$	زاویه ایستایی دینامیکی
τ_s	زمان آرام سازی ذره
τ_0	تنش برشی روی بستر
$\bar{\tau}_s$	تانسور تنش برای فاز ماسه
$\bar{\tau}_w$	تانسور تنش برای فاز آب
ν	ویسکوزیته سینماتیک سیال (آب)
ω	سرعت زاویه ای
ω_0	سرعت زاویه ای مماسی
$\overline{\Delta u}$	سرعت متوسط موضعی در فاصله ۲ میلیمتری از بستر
σ_g	انحراف معیار استاندارد توزیع دانه بندی رسوبات
θ	زاویه هجوم مؤلفه سرعت جریان نزدیک شونده
$\sum$	پارامتر تجمعی
σ	انحراف استاندارد توزیع اندازه رسوبات
σ_g	ضریب یکنواختی ذرات
Δ	چگالی نسبی