بسم الله الرحمن الرحيم

٩٦٢٤٦

دانشکده عمران

گروه عمران – آب

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران – آب

عنوان

بررسی اشکال پایهٔ پل بر الگوی جریان اطراف آن با استفاده از نرم افزار فلوئنت

اساتید راهنما

دکتر یوسف حسن زاده

دکتر حبیب حکیم زاده

استاد مشاور

دکتر محمد تقی اعلمی

پژوهشگر

شیوا عیاری

اسفند ماه ۱۳۸٦

۱۳۸۷ /۶/ ۲۵

۱۳۸۷ /۶/ ۰۵

ستایش و سپاس بیکران بایسته آن ایزد دانایی است که چراغ دانش را در اندیشه انسان فروزان می دارد، تا در پرتو آن هستی را از دورترین مرزهای کهکشان تا پیچاپیچ هزار توی یاخته‌ها بکاود و رازهای آن را بگشاید و بدین گونه خود را از بردگی جهل برهاند و به آزادی و بهروزی دست یابد.

قبل از هر چیز این پایان نامه را با خلوص تمام نثار وجود عزیزانی می کنم که عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان دراین سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است، قلب‌های بزرگشان فریادرس است و محبت‌های بی دریغشان هرگز فروکش نمی‌کند. عزیزانی که در تمامی مراحل زندگی و دوران تحصیل همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده‌اند و من در برابر عظمتشان، ناتوان و عاجز از تشکر کردن هستم:

پدر و مادر مهربانم و همسر فداکارم.

تشکر و قدردانی

وظیفه شاگردی خود می‌دانم تا مراتب سپاس و قدردانی ویژه خویش را با صمیمیت هر چه تمام‌تر به محضر استادان راهنمای گرانمایه، جناب آقای دکتر حبیب حکیم زاده که درکنار مقام استادی برای من حکم معلم اخلاق را نیز دارند و جناب آقای دکتر یوسف حسن زاده، مدیریت محترم گروه که با راهنمایی‌های ارزنده خود راهگشای اینجانب بودند و لذت آموختن و یادگیری را در محضر پربارشان تجربه کردم، تقدیم کنم.

همچنین ازاستاد گرامی، جناب دکتر محمد تقی اعلمی که به عنوان استاد مشاور با گشاده‌دستی کامل مرا در تنگناها راهنمایی کردند کمال تشکر دارم.

نام خانوادگی دانشجو : عیاری **نام** : شیوا

عنوان پایان نامه : بررسی اشکال پایهٔ پل بر الگوی جریان اطراف آن با استفاده از نرم افزار فلوئنت

استاد راهنما : دکتر یوسف حسن زاده
استاد راهنما : دکتر حبیب حکیم زاده
استاد مشاور : دکتر محمد تقی اعلمی

مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد **رشته** : عمران **گرایش** : عمران آب **دانشگاه** : تبریز
دانشکده : عمران **تاریخ فارغ التحصیلی** : اسفند ماه ۱۳۸٦ **تعداد صفحات** : ۹۳

واژه های کلیدی : پایه پل ، روش حجم محدود ، مدل عددی ، الگوی جریان ، شرایط مرزی ، تنش برشی ، شکل مقطع عرضی پایه

چکیده :

امروزه مسئله آبشستگی یکی از مسائل مهم ، در مهندسی رودخانه و سواحل می باشد . قرارگیری سازه های مختلف ، در مسیر جریانات رودخانه ای مستلزم تعبیه پایه هایی در این مناطق بوده ، درنتیجه این پایه ها ، همواره در معرض آبشستگی قرار خواهند داشت . از آنجایی که دقت پیشگویی الگوی آبشستگی ، به طور بسیار زیادی به شناخت الگوی جریان اطراف سازه و حرکت رسوب محدوده گودال آبشسته وابسته است ، بررسیهای برروی این عوامل مهم ، برای حصول نتایج بهتر ، امری ضروری است . در این تحقیق الگوی جریان اطراف پایه هایی با مقاطع دایره ، دوکی ، بیضی ، مستطیلی ، مربعی ، ترکیبی (مستطیل – دایره) به صورت سه بعدی ، با استفاده از نرم افزار Fluent شبیه سازی شده است . این نرم افزار معادلات جریان را به روش حجم محدود و الگوی مرکزیت سلول حل می نماید ، جهت شبکه بندی میدان محاسباتی از شبکه های منشوری استفاده شده است.

این شبکه ها با استفاده از پیش پردازنده Gambit ، تولید شده و سپس میدان محاسباتی با نرم افزار Fluent تحلیل شده است . در مدلسازی سه بعدی، جهت لحاظ نمودن اثر سطح آزاد ، روش حجم سیال (Volume of fluid) استفاده شده است . آشفتگی جریان با استفاده از مدل $\kappa - \varepsilon$ در محاسبات وارد شده است . در مدلهای سه بعدی مطرح شده، تغییرات پروفیل سطح آب و اثر تغییر شکل پایه ها در کاهش میزان تنش برشی و در نتیجه کاهش آبشستگی بررسی شده است .

در این مدلها ، جهت تأمین عمق مورد نیاز ، سرریزهایی در انتهای کانال به کار گرفته شده است.

فهرست مطالب

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول : کلیات	
۱- ۱ مقدمه	۲
۱-۱-۱ ضرورت تحقیق	۳
۱-۱-۲ روشهای پیش بینی پدیده های فیزیکی	۳
۱-۱-۳ روش تحقیق	٤
۱-۱-٤ نگاهی گذرا به فصلهای آتی	٤
فصل دوم : مفاهیم کلی و مروری برتحقیقات پژوهشگران	
۲-۱ آبشستگی	۷
۲-۲ الگوی جریان	۹
۲-۲-۱ سیستم گردابهای نعل اسبی	۱۰
۲-۲-۲ سیستم گردابهای دنباله دار	۱۵
۲-۲-۳ سیستم موج کمانی	۱٦
۲-۳ مطالعات عددی جریان و آبشستگی اطراف پایه های پل	۱۷
۲-۳-۱ تیسِنگ ، یِن و سُنگ	۱۸
۲-۳-۲ یِن، لِی و چِنگ	۱۹
۲-٤ تنش برش در جریانات آشفته	۲۰
۲-٤-۱ تنش برشی بستر	۲۱
۲-٤-۲ تنش برشی بستر در زیر یک پیچک نعل اسبی	۲۲
۲-۵ سطح آب	۲۳
۲-٦ پارامتر های موثر بر الگوی جریان اطراف پایه پل	۲٦

فصل سوم : معادلات حاکم و روش های حل

۳-۱ معادلات حاکم ۲۹

۳-۱-۱ مقدمه ۲۹

۳-۱-۲ مدل آشفتگی ۳۰

۳-۱-۳ تقسیم بنـدی مدلهای آشفتگی ۳۲

۳-۱-۳-۱ مدل های دو معادله ای $k-\varepsilon$ ۳۲

۳-۱-۳-۲ مدل $k-\varepsilon$ استاندارد ۳٤

۳-۱-۳-۳ مـدل $k-\varepsilon$ حالت RNG: ۳۵

۳-۱-۳-٤ ترمهای چشمه و چاه در مدلهای $k-\varepsilon$ ۳۷

۳-۲ روشهای گسسته سازی معادلات ۳۷

۳-۲-۱ روش حجم محدود ۳۸

۳-۳ فلوئنت ۳۹

۳-٤ روش های حل عددی موجود در نرم افزار FLUENT ٤۳

۳-٤-۱ خلاصه ای از روش های حل عددی موجود در نرم افزار ٤۳

۳-٤-۱-۱ روش حل تفکیکی ٤٤

۳-٤-۱-۲ روش حل پیوسته ٤٤

۳-٤-۱-۳ خطی سازی: روش ضمنی دربرابر روش صریح ٤٤

۳-٤-۲ روش حل تفکیکی ٤۵

۳-٤-۲-۱ گسسته سازی معادله ممنتم ٤۵

۳-٤-۲-۲ گسسته سازی معادله پیوستگی ٤۷

۳-۵ روش VOF ۵۰

۳-۵-۱ مقدمه ۵۰

۳-۵-۲ معادله حاکم بر روش VOF ۵۱

۳-۵-۳ روش های مختلف VOF موجود در نرم افزار ۵۱

۳-۵-۳-۱ الگوی دهنده وگیرنده (Donor-Acceptor) ۵۱

فهرست مطالب

۳-۵-۳-۲ الگوی یانگز(Geometric-Reconstruct) ۵۳

۳-۵-۳-۳ الگوی صریح اولر(Euler Explicit) ۵٤

۳-۵-۳-٤ الگوی ضمنی (Implicit) ۵٤

۳-٦ شـــرایط مـــرزی ۵٦

۳-٦-۱ اثـــر دیـــواره ۵۷

۳-٦-۲ توابع دیواره جهت شبیه سازی ناحیه نزدیک دیواره ۵۸

۳-٦-۳ قانون استاندارد دیواره ۵۹

۳-٦-٤ تابع دیواره نامتعادل ٦۱

فصل چهارم : تحلیل نتایج سه بعدی

٤-۱ مقدمه ٦۳

٤-۲ صحت سنجی نتایج ٦۳

٤-۲-۱ مدل تجربی ٦۳

٤-۲-۲ مدل عددی ٦٤

٤-۲-۳ تحلیل استقلال شبکه ٦۵

٤-۲-٤ مقایسه نتایج ۷۱

٤-۳ مدل سازی سه بعدی جریان اطراف پایه با مقطع بیضی ، دوکی ، مستطیلی، مربعی ، ترکیبی(مستطیل – دایره) ۷۹

٤-۳-۱ انتخاب مدل آشفتگی : ۸۱

٤-۳-۲ شرایط مرزی ۸۱

٤-۳-۲ نتایج ۸۲

فصل پنجم : نتیجه گیری

۵-۱ خلاصه مطالب ۹۲

۵-۲ نتایج بدست آمده ۹۲

۵-۳ محور مطالعات آتی ۹۳

فصل اول :

کلیات

۱- ۱ مقدمه

با توجه به اشتیاق فراون انسان برای پیشرفت و راحت زیستن، او دست به اقداماتی پیرامون خود زده و در نهایت به استفاده از طبیعت روی آورده است. او برای پاسخ به این نیازش راههایی را پیموده تا با سایر همنوعانش ارتباط نزدیکی برقرار کند. از آن زمان بود که راههای ارتباطی پا به عرصه گذاشت و انسان رفته رفته برای ارتباط راحت با سایرین ، به توسعه و گسترش راهها همت گماشت. در این بین موانعی نیز برای ارتباط راهها وجود داشت که از جمله آن میتوان به رودخانه ها و دریاها اشاره نمود.

به علت طبیعت کره زمین، گذر از چنین موانع طبیعی یک امر اجتناب ناپذیر است. انسان متفکر برای غلبه بر چنین موانع طبیعی، سعی در مرتبط نمودن دو ساحل رودخانه یا دریا داشته و این تفکر، آغاز پیدایش سازه هایی بنام پل و اسکله و ... بوده است، اما این سازه ها دارای انواع مختلفی می باشند که در همه آنها برای پابرجا ماندن، نباید پایه آنها در اثر جریانهای مختف دچار آبشستگی و در نتیجه نشست موضعی سازه و در نهایت تخریب سازه گردد، پس این عامل انسان را واداشت که در این زمینه به تحقیق و پژوهش بپردازد.

تعیین عمق آبشستگی از این جهت دارای اهمیت می باشد که اولاً بیانگر میزان پتانسیل تخریب جریان در اطراف سازه بوده و ثانیاً در طراحی ابعاد فونداسیون سازه هایی که در مسیر جریان آب قرار دارند نقش تعیین کننده ای را ایفاء می کنند. از این رو پیشگویی الگوی آبشستگی برای ایمنی طراحی سازه هایی که در معرض جریان آب قرار دارند امری ضروری است. اما وجود جداشدگی سه بعدی جریان و تولید گردابهای مختلف در اطراف این پایه مسئله را پیچیده کرده و این پیچیدگی به دلیل اثر متقابل بین جریان و مرز متغیر در طی روند آبشستگی وتوسعه گودال آبشستگی، افزایش می یابد. به همین دلیل با وجود تحقیقات گسترده ای که توسط محققان در این زمینه انجام شده، هنوز تئوری دقیقی در این باره ارائه نگردیده است.

از آنجایی که دقت پیشگویی الگوی آبشستگی به طور بسیار زیادی به شناخت الگوی جریان اطراف سازه و حرکت رسوب در محدوده گودال آبشستگی وابسته است، بررسیهای بیشتر بر روی این عوامل مهم برای حصول نتایج بهتر امری ضروری است.

۱-۱-۱ ضرورت تحقیق

در این تحقیق تغییرات پروفیل سطح آب اطراف پایه با مقطع دایره ای و نیز مقایسه ای از لحاظ بیشترین مقدار تنش برشی در هر یک از پایه ها با مقاطع مختلف دایره، بیضی، دوکی، مربعی، مستطیلی، ترکیبی (مستطیلی- دایره) انجام شده است ومی توان پیش بینی کرد که با تغییر شکل مقاطع الگوی جریان تحت تاثیر آن تغییر کرده به طوری که این امر باعث تغییر در مقدار تنش برشی بستر می شود. آبشستگی در محلی که مقدار تنش برشی ماکزیمم (τ_{max}) به نیروی مقاوم مواد رسوبی غلبه می کند آغاز می‌شود که مقدار مزبوراز شتاب و تفکیک جریان در هر دو سوی پایه بوجود می آید. از این رو پیشگویی الگوی آبشستگی برای ایمنی درطراحی سازه هایی که در معرض جریان آب قرار دارند امری ضروری است.

۱-۱-۲ روشهای پیش بینی پدیده های فیزیکی

به طور کلی روشهای پیش بینی یک پدیده فیزیکی به سه قسمت عمده تقسیم می شود:

- روش آزمایشگاهی
- روش تحلیلی
- روش عددی

روش آزمایشگاهی یا ساخت مدل فیزیکی برای شناخت یک پدیده، با وجود محاسن بسیار زیاد دارای اشکال اساسی هزینه بالا و غیر قابل انتقال بودن آن می باشد.

در روشهای تحلیلی، ابتدا با مشاهده پدیده فیزیکی، به بیان معادلات دیفرانسیل مربوطه پرداخته و پس از آن به تحلیل معادلات حاکم بر مساله می پردازیم. مشکلی که در این رابطه وجود دارد این است که بر خلاف پدیده هایی که برای آنها مدل ریاضی مناسبی ارائه شده اند (نظیر جریان آرام)،

پدیده هایی نیز وجود دارند که هنوز مدل ریاضی مناسبی برای آنها یافت نشده است. در اینجاست که استفاده از روشهای عددی یا تقریبی به عنوان یک راه سوم برای حل مسائل جای خود را باز می کند. مهمترین امتیاز یک روش عددی، پیش بینی محاسباتی و هزینه پایین آن در مقایسه با روشهای آزمایشگاهی است. در بیشتر کاربردها ، هزینه به کاربردن یک برنامه رایانه ای به مراتب کمتر از مخارج تحقیق آزمایشگاهی مشابه می باشد. این عامل وقتی که وضعیت فیزیکی مورد مطالعه بزرگ و پیچیده تر شود اهمیت بیشتری پیدا می کند و در حالی که قیمت اقلام مدلهای فیزیکی عموماً افزایش می یابد ، پیش بینی می شود که هزینه های محاسباتی در آینده احتمالاً بسیار کمتر خواهد بود[۲].

۱-۱-۳ روش تحقیق

در این تحقیق جهت بررسی الگوی جریان در اطراف پایه های پل با اشکال مختلف از نرم افزار FLUENT استفاده شده است. این نرم افزار معادلات جریان را به روش حجم محدود الگوی مرکزیت سلول حل می نماید.

این نرم افزار مدل های جامعی برای بازه بسیار بزرگی از مسائل ، شامل جریانهای قابل تراکم و غیر قابل تراکم، آرام و متلاطم ارائه می دهد. مجموعه مفیدی از مدل ها ، نظیر مدل های فازی در نرم افزار وجود دارد. این مدل ها می توانند برای تحلیل جریان اسپری ها و مسائلی مانند ورودی های مدل هواپیما و گرد بادها به کار روند. همچنین می توان جهت پیش بینی خرابی جت، حرکت مایع پس از شکست سد، کاویتاسیون، رسوبگذاری و جدایش جریان از این نرم افزار بهره برد [۲].

۱-۱-٤ نگاهی گذرا به فصلهای آتی

مطالبی که در فصول بعدی این پایان نامه آورده به شرح زیر است:

در فصل دوم به بررسی مفاهیم کلی و برخی از تحقیقات پژوهشگران مختلف پرداخته شده است.

در فصل سوم به معرفی نرم افزار، معادلات حاکم و روشهای حل موجود در نرم افزار پرداخته شده است.

در فصل چهارم به بررسی سه بعدی الگوی جریان در اطراف پایه پل پرداخته شده است، در ابتدا الگوی جریان در میدان پایه با مقطع دایره ای شکل مورد بررسی قرار گرفته است، سپس پایه هایی با مقاطع مستطیلی، بیضی، مربعی، دوکی و ترکیبی (مستطیل- دایره) مورد بررسی قرار گرفته است.
سرانجام در فصل پنجم پس از نگاهی اجمالی بر کارهای انجام شده در این تحقیق، نتایج بدست آمده جمع بندی شده و پیشنهاداتی جهت ارائه کار پژوهش حاضر آورده شده است.

فصل دوم:

مفاهیم کلی و مروری بر تحقیقات پژوهشگران

۲-۱ آبشستگی

آبشستگی پدیده ای است طبیعی که در نتیجه عمل فرسایش بستر توسط جریان آب و حمل مواد جدا شونده از آن بوسیله این جریان رخ می‌دهد. این پدیده که باعث فرو ریختن پلها می‌شود، بیشتر در مواقع سیلاب که نیاز به استفاده از پلها بیشتر احساس می‌شود، اتفاق می‌افتد. دلیل این امر در درجه اول، وجود جریان‌های نا پایدار در موقع سیل و تغییر جهت جریان اصلی رودخانه و در درجه دوم، وجود اجسام شناور و معلق در آب، مانند سنگ، چوب و یخ‌های شناور است که علاوه بر صدمه زدن بر پایه‌های پل، در بعضی مواقع باعث گرفتگی در مقطع سیلابی و افزایش عمق و سرعت جریان می شوند.

انواع آبشستگی که می‌تواند در اطراف پایه پل اتفاق بیافتد عبارتند از:

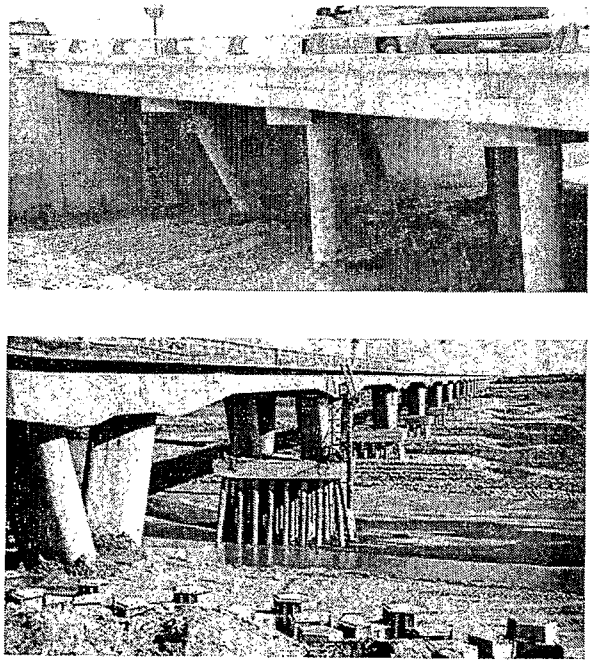
(۱) آبشستگی عمومی یا فرسایش که صرفنظر از وجود یا عدم وجود پل در بستر رودخانه ایجاد می‌شود.

(۲) آبشستگی انقباضی(تنگ شدگی) که به دلیل تنگ شدگی مقطع در اثر وجود سازه‌هایی چون پایه‌های پل در مسیر آبراهه بوجود می‌آید.

(۳) آبشستگی موضعی که توسط میدان جریان موضعی در اطراف پایه‌های پل ایجاد می شود.

آبشستگی موضعی در مجاورت پایه‌ها مهمترین عامل در تخریب پل‌ها گزارش شده است به طوری که طی سی سال گذشته، یکهزار از مجموع پانصد هزار پل ساخته شده بر روی رودخانه‌های آمریکا تخریب شده است که شصت درصد آنها در اثر آبشستگی موضعی بوده است. در حالیکه، سهم زلزله در این تخریب‌ها تنها دو درصد می‌باشد. متوسط خسارت تخریب پل‌ها که بر اداره فدرال بزرگراه های آمریکا تحمیل می‌شود سالانه در حدود پنجاه میلیون دلار است [۳]. در برخی کشورها به دلیل عدم درک صحیح از هیدرولیک جریان اطراف پایه و رعایت نکردن ملاحظات فنی در طراحی و اجرای پل‌ها هر ساله ده ها پل تخریب می‌شود که عمده دلیل آن آبشستگی موضعی است. این امر علاوه بر تحمیل خسارات فراوان به این کشورها، باعث اختلال در سیستم حمل و نقل و غیره شده است.

بنابراین برای شناخت دقیق این پدیده، پیش بینی میزان آبشستگی، لحاظ کردن آن در طراحی پل‌ها و مهمتر از همه، بکار بردن تمهیدات لازم برای کنترل و کاهش آبشستگی بسیار ضروری است.



(الف)

(ب)

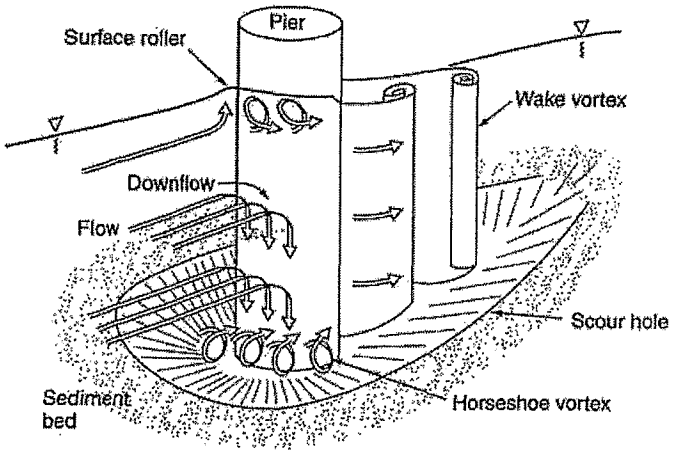
شکل ۲-۱ (الف)و (ب) نمایی از خرابی پل‌ها در اثر آبشستگی موضعی

از آنجایی که دقت پیشگویی الگوی آبشستگی به طور بسیار زیادی به شناخت الگوی جریان اطراف سازه و حرکت رسوب در محدوده گودال آبشستگی وابسته است، بررسیهای بیشتر بر روی این عوامل مهم برای حصول نتایج بهتر امری ضروری است.

میدان جریان سه بعدی اطراف پایه به علت تولید و تجزیه گردابهای متعدد بی نهایت پیچیده است، پیچیدگی میدان جریان در نتیجه اثر دینامیکی بین جریان و مرز متحرک بین گودال آبشسته توسعه یافته است. در اثر عبور جریان از اطراف پایه پل یک سری جریانات ثانویه رخ می دهد که این جریانات ثانویه از عوامل اصلی ایجاد آبشستگی موضعی می باشند.

۲-۲ الگوی جریان

الگوی جریان اطراف یک پایه استوانه‌ای بسیار پیچیده است و این پیچیدگی با پیشرفت حفره آبشستگی بیشتر می‌شود. مطابق شکل ۲-۲ ، اگر پایه‌ای در برابر جریان آب وجود داشته باشد، سرعت جریان در برخورد به سطح بالا دست پایه به صفر می‌رسد. به دلیل اینکه پروفیل سرعت از سطح آزاد به سمت کف از میزان ماکزیمم به صفر کاهش می‌یابد، فشار دینامیکی ($\rho u^2/2$) نیز از سطح آزاد به سمت کف کاهش می‌یابد که در آن u سرعت جریان در هر تراز است. این گرادیان فشار رو به پایین، جریان رو به پایینی را ایجاد می‌کند. جریان رو به پایین در هر تراز بالای بستر، دارای توزیع سرعت خاص است به طوری که در محل برخورد جریان اصلی به پایه و همچنین در فاصله ای در بالا دست پایه دارای سرعت صفر است. مقدار حداکثر سرعت جریان رو به پایین در صورتی که حفره آبشستگی وجود نداشته باشد، در مجاورت بستر و با توجه به شکل پایه حدوداً برابر $0.4u_0$ است که در آن u_0 سرعت ورودی جریان است. در حالتیکه عمق آبشستگی دو برابر قطر پایه باشد، در محلی واقع در زیر بستر اولیه و به فاصله‌ای برابر با قطر پایه از آن، مقدار حداکثر سرعت جریان رو به پایین برابر $0.8u_0$ می‌باشد [٤].



شکل ۲-۲ الگوی جریان در اطراف پایه پل

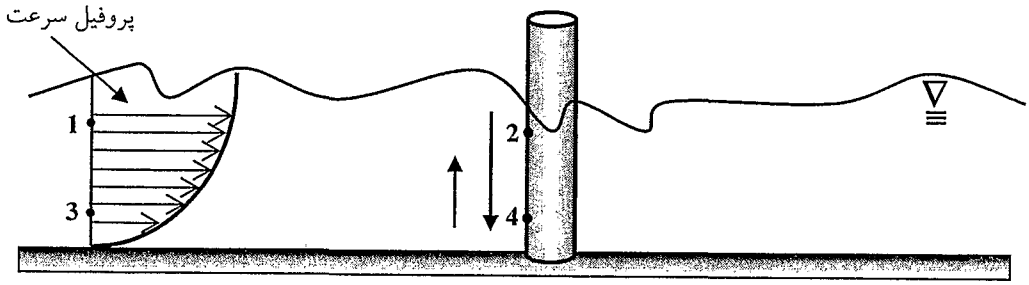
۲-۲-۱ سیستم گردابهای نعل اسبی[۱]

وقتی جریان به پایه پل برخورد می کند سرعتش به صفر کاهش یافته و این کاهش سرعت باعث ایجاد فشار ایستایی می شود . از آنجایی که سرعت جریان از بستر رودخانه به طرف سطح آب افزایش می یابد ، فشار ایستایی بیشتری در ترازهای بالاتر روی سطح بالادست پایه ایجاد میشود و این گرادیان فشار معکوس باعث تشکیل جریان رو به پایین بر روی سطح بالا دست پایه می گردد . به طور کلی طبق شکل ۲-۳ ذرات سیال در مرزهای پایین نزدیک بستر به علت نیروی اصطکاک کف با سرعت کمتری نسبت به سرعت ذرات در سطح جریان حرکت کرده و پروفیلی طبق شکل ۲-۳ ایجاد میشود طبق معادله برنولی و شرایط شکل ۲-۳ :

$$\frac{p_1}{\rho g}+\frac{v_1^2}{2g}+z_1=\frac{p_2}{\rho g}+\frac{v_2^2}{2g}+z_2 \quad \Rightarrow \begin{cases} p_2=p_1+\dfrac{\rho v_1^2}{2} \\ p_4=p_3+\dfrac{\rho v_3^2}{2} \end{cases} \qquad (۱-۲)$$

از آنجایی که $v_1 > v_3$ می باشد ، وقتی این اختلاف سرعت به حدی برسد که داشته باشیم:

$$(p_2)\ \text{dynamic pressure} > (p_4)\ \text{dynamic pressure}$$



شکل ۲ - ۳ نحوه جریان رو به پایین در جلو پایه ($z_1=z_2$ و $z_4=z_3$ و $v_2=v_4=0$)

۱ . Horseshoe Vortices

در آن صورت اختلاف فشار مزبور، باعث جریان رو به پایین در جلو پایه می شود، این جریان رو به پایین ، نظیر یک جت عمودی آب، مواد بستر کناره پایه را بلند کرده و این مواد توسط جریان آب به پایین دست منتقل می شود.

جریان رو به پایین در برخورد با بستر ضمن حفر بستر پس از برخورد با آن به طرف بالا چرخیده و ایجاد گرداب می کند و در واقع لایه مرزی بالادست پایه دستخوش یک پخش شدگی سه بعدی می شود ، این لایه مرزی پخش شده به سمت بالا حرکت کرده و باعث ایجاد یک گردابه فنری شکل که در پلان به نعل اسب شبیه است، می شود و از اینرو به سیستم گرداب نعل اسبی معروف است. حفر گودال آبشستگی توسط گرداب نعل اسبی تا جایی ادامه می یابد تا حجم آب داخل حفره زیاد شده و انرژی گرداب را مستهلک نماید.

Breusers و همکاران نشان دادند که سیستم گردابه نعل اسبی عامل شروع آبشستگی نبوده و تنها نتیجه جریان رو به پایین به درون گودال آبشستگی می باشد و در واقع جریان رو به پایین عامل اصلی آبشستگی میباشد، این نتیجه گیری توسط نتایج آزمایشگاهی Melville ، Hjorth و Roudkivi نیز بیان شده است [۵]. شکل پایه ها نیز در تشکیل این نوع گردابه نقش بسزایی دارد، به طوری که هر چه میزان انطباق جریان با شکل پایه ها بیشتر باشد گرادیان فشار معکوس کمتر بوده و در نتیجه قدرت گردابه های نعل اسبی کمتر خواهد شد. همچنین Darghahi بیان کرد که این سیستم گردابه حالت شبه تناوبی داشته و قدرت آن در طول زمان و طی روند آبشستگی نوسان می کند [٦].

شکل ۲-٤ تغییر تعداد و شکل پیچک‌های نعل اسبی را با افزایش زمان نشان می‌دهد.

Yuhi و همکاران نیز به این نتیجه رسیدند که این گردابها تنش برشی را در سطح بستر افزایش داده و باعث فرسوده شدن قسمت عمده رسوب اطراف پایه می شوند ، همچنین شکل گردابهای نعل اسبی شدیداً تحت تاثیر پروفیل بستر نزدیک استوانه قرار دارد، به همین علت رفتار گردابی بالای بستر آبشسته عامل مهم تخمین آبشستگی محلی است. بدین دلیل کوششهای زیادی برای درک ساختار جریان بر روی بستر آبشسته انجام شده است [۷].