



دانشگاه آزاد اسلامی  
واحد تهران مرکزی  
دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد (M.Sc)

گرایش: مهندسی آب

**عنوان:**

**شبیه‌سازی عددی الگوی جریان حول پایه کج پل**

استاد راهنما:

دکتر مسعود قدسیان

استاد مشاور:

دکتر هومن حاجی‌کندی

پژوهشگر:

فاطمه کلالی

تابستان ۱۳۹۱



ISLAMIC AZAD UNIVERSITY  
Central Tehran Branch  
Faculty of Technology and Engineering

“M.Sc” Thesis

Group: Water Engineering

Subject:

**Numerical Simulation of Flow Pattern  
around Inclined Bridge Pier**

Supervisor:

Dr. Masoud Ghodsian

Advisor:

Dr. Hooman HajiKandi

By:

Fatemeh Kalali

Summer 2012

## تقدیر و تشکر

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر قدسیان به عنوان استاد راهنما، جناب آقای دکتر حاجی کندی به عنوان استاد مشاور و همچنین دوست عزیزم خانم مهندس رستم‌آبادی که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده‌اند، کمال تشکر را دارم.

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می‌نمایم به:

- محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم، به خاطر همه‌ی تلاش‌های محبت‌آمیزی که در دوران مختلف زندگی‌ام انجام داده‌اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند.
- به همسر مهربانم، که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است.
- به دختر نازنینم، که صبورانه و صادقانه من را همراهی نموده است تا بتوانم در کمال آرامش و آسایش به تهیه و تنظیم پایان‌نامه بپردازم.
- به اساتید فرزانه و فرهیخته‌ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.
- به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند.
- به آنان که نفس خیرشان و دعای روح‌پرورشان بدرقه‌ی راهم بود.

بارالها به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته‌ی آنان جامه‌ی عمل بپوشانم.

پروردگارا حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کهنسال عنایت بفرما.

## فهرست مطالب

### صفحه

### عنوان

#### فصل اول: کلیات

۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- ضرورت انجام تحقیق
۴	۳-۱- هدف از انجام تحقیق
۴	۴-۱- معرفی فصول پایان نامه

#### فصل دوم: مطالعات نظری و مروری بر تحقیقات گذشته

۶	۱-۲- مقدمه
۶	۲-۲- انواع آبخستگی
۶	۱-۲-۲- آبخستگی عمومی
۷	۱-۲-۲-۱- آبخستگی عمومی بلند مدت
۷	۲-۲-۲-۱- آبخستگی عمومی کوتاه مدت
۸	۲-۲-۲- آبخستگی محلی
۸	۱-۲-۲-۲- آبخستگی تنگ‌شدگی
۸	۲-۲-۲-۲- آبخستگی موضعی و عوامل ایجاد سیستم‌های گردابی در پایه‌ها
۹	۱-۲-۲-۲-۲- گرداب نعل اسبی
۱۱	۲-۲-۲-۲-۲- گرداب برخاستی
۱۲	۳-۲- مروری بر تحقیقات گذشته
۱۳	۱-۳-۲- بررسی مطالعات آزمایشگاهی
۱۶	۲-۳-۲- بررسی مطالعات عددی

#### فصل سوم: معرفی نرم‌افزار و معادلات حاکم بر جریان سیال

۲۴	۱-۳- مقدمه
۲۵	۲-۳- معرفی نرم‌افزار Fluent و نرم‌افزار Gambit
۲۶	۳-۳- معادلات حاکم بر جریان
۲۷	۴-۳- مدل‌های آشفتگی

۲۷	۳-۴-۱- مدل‌های آشفتگی بر پایه لزجت گردابه‌ای
۲۷	۳-۴-۱-۱- مدل‌های صفر معادله ای
۲۸	۳-۴-۱-۲- مدل‌های یک معادله ای
۲۹	۳-۴-۱-۳- مدل‌های دو معادله ای
۲۹	۳-۴-۲- مدل‌های آشفتگی بر پایه تنش‌های رینولدز
۳۰	۳-۵- انفصال معادلات حاکم
۳۱	۳-۵-۱- روش‌های مختلف انفصال ترم‌های جابجایی و پخش
۳۱	۳-۵-۱-۱- روش آپویند مرتبه اول (F.O.U)
۳۱	۳-۵-۱-۲- روش آپویند مرتبه دوم (S.O.U)
۳۲	۳-۵-۱-۳- الگوی قاعده توانی
۳۲	۳-۶- کوپل سرعت و فشار
۳۴	۳-۷- نحوه برخورد مدل‌های آشفتگی با اثر دیوار
۳۶	۳-۸- تابع استاندارد دیواره
۳۸	۳-۹- اثر زبری دیوار
۳۸	۳-۱۰- شرایط مرزی و اولیه
	<b>فصل چهارم: شبیه‌سازی عددی الگوی جریان حول پایه پل قائم و کج</b>
۴۱	۴-۱- هدف
۴۱	۴-۲- مشخصات میدان حل
۴۳	۴-۳- شرایط اعمال شده به مدل
۴۳	۴-۳-۱- شرایط مرزی
۴۳	۴-۳-۲- تنظیم شبکه بندی برای مدل آشفتگی RSM
۴۵	۴-۴- بررسی صحت عملکرد مدل عددی و واسنجی آن
۴۷	۴-۴-۱- مدل سازی سری اول
۴۷	۴-۴-۲- مدل سازی سری دوم
۴۸	۴-۴-۳- مدل سازی سری سوم
۴۸	۴-۵- بررسی خطوط جریان
۴۸	۴-۵-۱- کانال بدون پایه

- ۴۹-۵-۲- بررسی خطوط جریان حول پایه قائم در مدل عددی و مقایسه آن با مدل آزمایشگاهی
- ۵۲-۵-۳- پایه کج به سمت چپ در صفحه عمود بر جریان با زاویه ۲۱ درجه
- ۵۵-۵-۴- پایه کج به سمت راست در صفحه عمود بر جریان با زاویه ۲۱ درجه
- ۵۶-۵-۵- پایه پل کج به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۲۱ درجه
- ۵۸-۵-۶- پایه پل کج به موازات جریان به سمت بالادست با زاویه ۲۱ درجه
- ۶۰-۵-۷- پایه پل کج به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۷ درجه
- ۶۲-۵-۸- پایه پل کج به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۱۴ درجه
- ۶۳-۶- بررسی تغییرات سرعت
- ۶۳-۶-۱- بررسی تغییرات مؤلفه عرضی سرعت  $V$
- ۶۳-۶-۱-۱- پایه پل قائم
- ۶۵-۶-۱-۲- پایه پل کج شده به سمت چپ در صفحه عمود بر جریان با زاویه ۲۱ درجه
- ۶۶-۶-۱-۳- پایه پل کج شده به سمت راست در صفحه عمود بر جریان با زاویه ۲۱ درجه
- ۶۸-۶-۱-۴- پایه پل کج شده به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۲۱ و ۱۴ و ۷ درجه
- ۷۱-۶-۲- بررسی تغییرات مؤلفه طولی سرعت  $U$
- ۷۱-۶-۲-۱- بررسی کانتورهای مؤلفه طولی سرعت  $U$
- ۷۱-۶-۲-۱-۱- پایه پل قائم
- ۷۳-۶-۲-۱-۲- کانال بدون پایه پل
- ۷۴-۶-۲-۱-۳- پایه پل کج شده به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۲۱ درجه
- ۷۵-۶-۲-۱-۴- پایه پل کج شده به موازات جریان به سمت بالادست با زاویه ۲۱ درجه
- ۷۷-۶-۲-۱-۵- پایه کج شده به سمت راست و چپ در صفحه عمود بر جریان با زاویه ۲۱ درجه
- ۷۹-۶-۲-۱-۶- پایه پل کج شده به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۱۴ و ۷ درجه
- ۸۲-۶-۲-۲- بررسی کانتورهای عمقی مؤلفه طولی سرعت  $U$  در مقاطع عرضی فلوم
- ۸۵-۶-۲-۳- بررسی کانتورهای عمقی مؤلفه طولی سرعت  $U$  در مقاطع طولی فلوم
- ۸۹-۶-۳- بررسی تغییرات مؤلفه قائم سرعت  $W$
- ۸۹-۶-۳-۱- بررسی کانتورهای مؤلفه قائم سرعت  $W$
- ۸۹-۶-۳-۱-۱- پایه پل قائم
- ۹۱-۶-۳-۲- پایه پل کج شده با زاویه ۲۱ درجه در صفحه عمود بر جریان به سمت چپ

- ۹۲ ۴-۶-۳-۱-۳- پایه پل کج شده با زاویه ۲۱ درجه در صفحه عمود بر جریان به سمت راست
- ۹۴ ۴-۶-۳-۱-۴- پایه پل کج شده به سمت های پائین دست و بالادست با زاویه ۲۱ درجه
- ۹۶ ۴-۶-۳-۱-۵- پایه پل کج شده به سمت های پائین دست با زاویه ۱۴ و ۷ درجه
- ۹۹ ۴-۶-۳-۲- بررسی کانتورهای عمقی مؤلفه قائم سرعت  $W$  در مقاطع عرضی فلوم
- ۱۰۰ ۴-۶-۳-۳- بررسی کانتورهای عمقی مؤلفه قائم سرعت  $W$  در مقاطع طولی فلوم
- ۱۰۳ ۴-۷- بررسی توزیع تنش برشی وارد بر بستر صلب
- ۱۰۳ ۴-۷-۱- مبانی تئوری محاسبه تنش برشی
- ۱۰۵ ۴-۷-۲- تنش برشی بستر صلب در اطراف پایه پل در ۷ حالت کج شدگی متفاوت
- ۱۰۵ ۴-۷-۲-۱- توزیع تنش برشی بستر حول پایه پل قائم
- ۱۰۶ ۴-۷-۲-۲- توزیع تنش برشی بستر صلب حول پایه کج شده به سمت چپ با زاویه ۲۱ درجه
- ۱۰۷ ۴-۷-۲-۳- توزیع تنش برشی بستر حول پایه کج شده به سمت راست با زاویه ۲۱ درجه
- ۱۰۸ ۴-۷-۲-۴- توزیع تنش برشی بستر حول پایه کج شده به سمت پایین دست با زوایای ۱۴، ۷ و ۲۱
- ۱۰۹ ۴-۷-۲-۵- توزیع تنش برشی بستر حول پایه پل کج شده به سمت بالادست با زاویه ۲۱ درجه

#### فصل پنجم: خلاصه نتایج و پیشنهادات

- ۱۱۱ ۵-۱- خلاصه نتایج
- ۱۱۴ ۵-۲- پیشنهادات
- ۱۱۶ مراجع



## فهرست شکل‌ها

### عنوان

### صفحه

۳	شکل (۱-۱): تخریب پایه پل در اثر آبستگي در چمچال کرمانشاه
۳	شکل (۲-۱): پل ساخته شده با پایه‌های کج در صفحه عمود بر جریان در کشور تايوان
۷	شکل (۱-۲): تقسیم‌بندی انواع آبستگي
۹	شکل (۲-۲): الگوی آبستگي
۱۰	شکل (۳-۲): گردابه نعل اسبی و برخاستی
۱۲	شکل (۴-۲): وضعیت گردابه‌های برخاستی در پشت پایه استوانه‌ای
۱۷	شکل (۵-۲): بردارهای سرعت در اطراف گروه شمع در حالت جریان پایدار
۱۸	شکل (۶-۲): مقایسه بین نتایج مدل عددی در دو حالت مدل آشفتگی $K-\epsilon$ و RSM
۱۹	شکل (۷-۲): خطوط جریان به فاصله ۵ سانتیمتری از بستر کانال و در اطراف پایه
۲۰	شکل (۸-۲): نواحی تنش برشی بستر اطراف پایه‌های پل بدون شکاف و شکافدار
۲۰	شکل (۹-۲): خطوط جریان اطراف پایه‌های با فواصل مختلف از هم
۲۱	شکل (۱۰-۲): شکل شماتیک پایه‌های مدل‌سازی شده
۲۲	شکل (۱۱-۲): بزرگی گردابه حول چند شکل مختلف مقاطع پایه پل در حالت اصابت مستقیم جریان
۲۲	شکل (۱۲-۲): بزرگی گردابه حول چند شکل مختلف مقاطع پایه پل در حالت اصابت مایل جریان
۳۱	شکل (۱-۳): موقعیت گره‌های مجاور گره مرکزی در طرح SOU
۳۵	شکل (۲-۳): ناحیه‌ی نزدیک دیواره و معادلات حاکم بر آن
۳۵	شکل (۳-۳): دو روش مختلف برای مدل‌سازی منطقه نزدیک دیواره
۴۱	شکل (۱-۴): مشخصات هندسی میدان حل برای حالت پایه قائم
۴۲	شکل (۲-۴): مشخصات هندسی میدان حل برای حالت‌های مختلف قرارگیری پایه کج‌شده
۴۴	شکل (۳-۴): شبکه‌بندی میدان حل
۴۶	شکل (۴-۴): پروفیل طولی سرعت در موقعیت‌های مختلف قبل و بعد از پایه قائم برای عرض‌های ۰/۲۳، ۰/۲۸، ۰/۳۱، ۰/۳۶ و ۰/۴۳
۴۹	شکل (۵-۴): خطوط جریان در چهار تراز $(d/d_0)$ متفاوت برای کانال بدون پایه
۵۱	شکل (۶-۴): خطوط جریان حاصل از مدل‌سازی عددی در پنج تراز $(d/d_0)$ متفاوت حول پایه قائم
۵۲	شکل (۷-۴): خطوط جریان حاصل از مدل آزمایشگاهی در پنج تراز $(d/d_0)$ متفاوت حول پایه قائم
۵۴	شکل (۸-۴): خطوط جریان حاصل از مدل‌سازی عددی در پنج تراز $(d/d_0)$ متفاوت حول پایه کج‌شده با زاویه ۲۱ درجه به سمت چپ در صفحه عمود بر جریان
۵۴	شکل (۹-۴): خطوط جریان حاصل از مدل آزمایشگاهی در پنج تراز $(d/d_0)$ متفاوت حول پایه کج‌شده با زاویه ۲۱ درجه به سمت چپ در صفحه عمود بر جریان
۵۶	شکل (۱۰-۴): خطوط جریان حاصل از مدل‌سازی عددی در پنج تراز $(d/d_0)$ متفاوت حول پایه کج‌شده با زاویه ۲۱ درجه به سمت راست در صفحه عمود بر جریان
۵۷	شکل (۱۱-۴): خطوط جریان حاصل از مدل‌سازی عددی در پنج تراز $(d/d_0)$ متفاوت حول پایه کج‌شده با زاویه ۲۱ درجه به موازات جریان به سمت پایین‌دست

- ۵۸ شکل (۱۲-۴): خطوط جریان حاصل از مدل آزمایشگاهی در چهار تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده با زاویه ۲۱ درجه به موازات جریان به سمت پایین دست
- ۶۰ شکل (۱۳-۴): خطوط جریان حاصل از مدل سازی عددی در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده با زاویه ۲۱ درجه به موازات جریان به سمت بالا دست
- ۶۱ شکل (۱۴-۴): خطوط جریان حاصل از مدل سازی عددی در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۷ درجه
- ۶۳ شکل (۱۵-۴): خطوط جریان حاصل از مدل سازی عددی در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۱۴ درجه
- ۶۵ شکل (۱۶-۴): کانتورهای مؤلفه عرضی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه قائم
- ۶۶ شکل (۱۷-۴): کانتورهای مؤلفه عرضی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به سمت چپ در صفحه عمود بر
- ۶۷ شکل (۱۸-۴): کانتورهای مؤلفه عرضی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به سمت راست در صفحه عمود بر
- ۶۹ شکل (۱۹-۴): کانتورهای مؤلفه عرضی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۲۱ درجه
- ۷۰ شکل (۲۰-۴): کانتورهای مؤلفه عرضی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۱۴ درجه
- ۷۱ شکل (۲۱-۴): کانتورهای مؤلفه عرضی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۷ درجه
- ۷۳ شکل (۲۲-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه قائم
- ۷۴ شکل (۲۳-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در سه تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت برای حالت بدون پایه پل
- ۷۵ شکل (۲۴-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۲۱ درجه
- ۷۶ شکل (۲۵-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به موازات جریان به سمت بالا دست با زاویه ۲۱ درجه
- ۷۸ شکل (۲۶-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به سمت راست با زاویه ۲۱ درجه
- ۷۹ شکل (۲۷-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به سمت چپ با زاویه ۲۱ درجه
- ۸۰ شکل (۲۸-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۱۴ درجه
- ۸۱ شکل (۲۹-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در پنج تراز ( $d/d_0$ ) متفاوت حول پایه کج شده به موازات جریان به سمت پایین دست با زاویه ۷ درجه
- ۸۳ شکل (۳۰-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در عمق برای مقاطع عرضی پایه قائم
- ۸۴ شکل (۳۱-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در عمق برای مقاطع عرضی پایه کج شده به سمت چپ
- ۸۵ شکل (۳۲-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در عمق برای مقاطع عرضی پایه کج شده به سمت راست
- ۸۷ شکل (۳۳-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در عمق برای مقاطع طولی در حالت های با پایه قائم و پایه کج شده به سمت پایین دست
- ۸۹ شکل (۳۴-۴): کانتورهای مؤلفه طولی سرعت در عمق برای مقاطع طولی حالت با پایه کج شده به سمت بالا دست
- ۹۰ شکل (۳۵-۴): کانتورهای مؤلفه قائم سرعت به موازات بستر برای حالت با پایه قائم

- شکل (۴-۳۶): کانتورهای مؤلفه قائم سرعت به موازات بستر برای حالت با پایه کج شده با زاویه ۲۱ درجه به سمت چپ ۹۲
- شکل (۴-۳۷): کانتورهای مؤلفه قائم سرعت به موازات بستر برای حالت با پایه کج شده با زاویه ۲۱ درجه به سمت راست ۹۳
- شکل (۴-۳۸): کانتورهای مؤلفه قائم سرعت به موازات بستر برای حالت با پایه کج شده به سمت پایین دست با زاویه ۲۱ درجه ۹۵
- شکل (۴-۳۹): کانتورهای مؤلفه قائم سرعت به موازات بستر برای حالت با پایه کج شده به سمت بالادست با زاویه ۲۱ درجه ۹۶
- شکل (۴-۴۰): کانتورهای مؤلفه قائم سرعت به موازات بستر برای حالت با پایه کج شده به سمت پایین دست با زاویه ۱۴ درجه ۹۷
- شکل (۴-۴۱): کانتورهای مؤلفه قائم سرعت به موازات بستر برای حالت با پایه کج شده به سمت پایین دست با زاویه ۷ درجه ۹۸
- شکل (۴-۴۲): کانتورهای مؤلفه قائم سرعت در عمق برای مقاطع عرضی در حالت با پایه قائم ۹۹
- شکل (۴-۴۳): کانتورهای مؤلفه قائم سرعت در عمق برای مقاطع عرضی حالت های پایه کج شده با زاویه ۲۱ درجه به سمت راست و حب ۱۰۰
- شکل (۴-۴۴): کانتورهای مؤلفه قائم سرعت در عمق برای مقاطع طولی در حالت های با پایه قائم و با پایه کج شده به سمت پایین دست با زاویه ۲۱ درجه ۱۰۱
- شکل (۴-۴۵): کانتورهای مؤلفه قائم سرعت در عمق برای مقاطع طولی در حالت با پایه کج شده به سمت بالادست با زاویه ۲۱ درجه ۱۰۲
- شکل (۴-۴۶): تنش های آشفتگی (تنش های رینولدز) وارد بر یک المان فرضی ۱۰۳
- شکل (۴-۴۷): توزیع سرعت در جریان آشفته در ناحیه قانون جداره ۱۰۴
- شکل (۴-۴۸): تنش برشی محاسبه شده حول پایه قائم واقع بر بستر صلب ۱۰۵
- شکل (۴-۴۹): تنش برشی محاسبه شده حول پایه کج شده به سمت چپ با زاویه ۲۱ درجه ۱۰۶
- شکل (۴-۵۰): تنش برشی محاسبه شده حول پایه کج شده به سمت راست با زاویه ۲۱ درجه ۱۰۷
- شکل (۴-۵۱): تنش برشی محاسبه شده حول پایه کج شده به سمت پایین دست با زاویه ۷ درجه ۱۰۸
- شکل (۴-۵۲): تنش برشی محاسبه شده حول پایه کج شده به سمت پایین دست با زاویه ۱۴ درجه ۱۰۸
- شکل (۴-۵۳): تنش برشی محاسبه شده حول پایه کج شده به سمت پایین دست با زاویه ۲۱ درجه ۱۰۹
- شکل (۴-۵۴): تنش برشی محاسبه شده حول پایه کج شده به سمت بالادست با زاویه ۲۱ درجه ۱۰۹

## فهرست جدول‌ها

### صفحه

### عنوان

۱۹	جدول (۱-۲): شکل‌های شکاف پایه پل مدل‌سازی شده
۲۸	جدول (۱-۳): طول‌های اختلاط جریان‌های آشفته دو بعدی
۲۹	جدول (۲-۳): ثابت‌های آزمایشگاهی برای مدل آشفتگی $K-\varepsilon$
۳۰	جدول (۳-۳): ثابت‌های آزمایشگاهی برای مدل آشفتگی RSM
۳۷	جدول (۴-۳): مقدار $y^+$ در زیر لایه‌ها
۴۳	جدول (۱-۴): مشخصات هیدرولیکی میدان جریان
۴۵	جدول (۲-۴): مشخصات شبکه‌بندی‌های مختلف در کانال
۴۷	جدول (۳-۴): مشخصات مدل‌سازی با زیری‌های مختلف در کانال

## چکیده:

پل‌های رودخانه‌ای از جمله سازه‌های تأثیرگذار در رودخانه‌ها می‌باشند. وجود پایه پل‌ها در بستر دائم و سیلابی رودخانه‌ها، مانعی برای عبور جریان بوده و باعث ایجاد گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی می‌شود که از عوامل ایجاد چاله‌های فرسایشی در زیر پایه‌ها و کوله‌های پل می‌باشد. تحقیقات گسترده‌ای راجع به الگوی جریان اطراف پایه پل صورت پذیرفته است. از مواردی که تا کنون کمتر مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته، بحث خصوصیات جریان اطراف پایه (المان‌های لاغر) پل کج در برابر جریان آب می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار فلونت، به شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در اطراف پایه کج استوانه‌ای پل و صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی موجود پرداخته شده است. در این تحقیق به‌منظور بررسی الگوی جریان اطراف پایه به قطر ۴ سانتیمتر در حالت‌های قائم، کج‌شدگی در صفحه عمود بر جریان به سمت راست و چپ با زاویه ۲۱ درجه، کج‌شدگی به موازات جریان به سمت بالادست با زاویه ۲۱ درجه و به سمت پائین‌دست با زوایای ۷، ۱۴ و ۲۱ درجه، مقادیر سرعت در ترازها و مقاطع مختلف مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. بررسی نتایج تحقیق نشان داد در کلیه حالت‌ها گردابه برخاستگی در پائین‌دست پایه تشکیل می‌شود. همچنین برگشت جریان به سمت پایه در خلاف جهت جریان در داخل گردابه‌ها کاملاً مشهود است، که از نکات جالب‌توجه در گردابه برخاستگی می‌باشد. در ضمن تراکم خطوط جریان در اطراف پایه و در اطراف محل قرارگیری گردابه‌ها نشانگر سرعت گرفتن جریان در این نواحی به‌علت تنگ‌شدگی سطح مقطع ناشی از وجود پایه و گردابه‌ها می‌باشد. تمرکز و تجمع کانتورهای تنش برشی در مجاورت پایه در حالت کج‌شدگی به سمت پائین‌دست با زاویه ۲۱ درجه کمترین و در حالت کج‌شدگی به سمت بالادست با زاویه ۲۱ درجه بیشترین می‌باشد، لذا انتظار می‌رود که پایه (در صورت فرسایش‌پذیر بودن بستر) در حالت کج‌شدگی به سمت پائین‌دست با زاویه ۲۱ درجه فرسایش کمتری را نسبت به بقیه حالات قرارگیری پایه داشته باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پایه پل کج، الگوی جریان، تنش برشی، گردابه برخاستگی

فصل اول:

كليات

## فصل اول: کلیات

### ۱-۱- مقدمه

پل‌های رودخانه‌ای یکی از سازه‌های تأثیرگذار در رودخانه‌ها می‌باشند. وجود پایه‌ها در بستر دائم و سیلابی رودخانه، مانعی برای عبور جریان بوده و باعث ایجاد گرداب‌های نعل اسبی و برخاستی می‌شود که از عوامل ایجاد چاله‌های فرسایشی در زیر پایه‌ها و کوله‌های پل می‌باشد. با قرارگیری پایه پل در مسیر حرکت آب، جریان سه بعدی پیچیده‌ای اطراف پایه و بعد از آن شکل می‌گیرد که ممکن است از قدرت کافی برای فرسایش بستر اطراف پایه برخوردار باشد. در نتیجه با گذشت زمان، حفره‌ای اطراف پایه تشکیل می‌شود که در صورت طراحی نادرست و پیش بینی کم عمق پی، می‌تواند سبب آسیب جدی و حتی فرو ریختن عرشه پل شود. این فرسایش علاوه بر فرسایش عمومی که می‌تواند در محل قرارگیری پل به وقوع بپیوندد، از نوع موضعی می‌تواند باشد. تحقیقات گسترده‌ای راجع به الگوی جریان و آبستگي اطراف پایه پل صورت پذیرفته است. از مواردی که تا کنون کمتر مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته، بحث خصوصیات جریان اطراف پایه (المان‌های لاغر) پل کج در برابر جریان آب می‌باشد که در این پایان نامه به آن پرداخته شده است.

### ۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

پایه‌های پل موجب فشردگی افقی جریان در رودخانه‌ها می‌شوند که به لحاظ تأثیر مشابه تکیه‌گاه‌ها می‌باشند. آبستگي محلی در اطراف پایه‌های پل به خصوصیات جریان و هندسه پایه شدیداً بستگی دارد. افزایش عمق چاله فرسایشی باعث شستگی خاک کنار پایه و کوله‌ها و گسترش عمق آن به زیر پی در هنگام سیل شده و نتیجتاً باعث تخریب یا نشست پایه‌ها و کوله‌های پل می‌گردد. رایج‌ترین دلیل شکست پل‌ها، آبستگي مصالح بستر اطراف پی پل‌ها توسط سیلاب می‌باشد. سالانه بسیاری از پل‌ها بر اثر آبستگي و لغزش پایه‌ها در مواقع سیلابی دچار خرابی می‌شوند که ترمیم خسارات ناشی از پدیده آبستگي در پل‌ها باعث صرف هزینه و زمان بسیار زیاد می‌شود (شکل ۱-۱). از این‌رو، برآورد صحیح از عمق آبستگي در محدوده پایه پل‌ها می‌تواند باعث ایجاد حاشیه اطمینان طراحی و کاهش هزینه‌های طراحی و همچنین کاهش هزینه‌های نگهداری پل‌ها و استفاده به‌موقع در مواقع بحرانی شود. لذا دانشمندان با روش‌های متفاوت از جمله استفاده از مدل‌های فیزیکی، مدل‌های عددی و بررسی صحرایی سعی در شناخت هر چه بیشتر الگوی جریان در شرایط گوناگون می‌نمایند تا بر اساس آن بتوانند شناختی از آبستگي نیز داشته باشند.



شکل (۱-۱): تخریب پایه پل در اثر آبستگي در چمچال کرمانشاه (سعیدی نژاد و همکاران، ۱۳۸۴)

از مواردی که تا کنون کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته، بحث قرارگیری پایه به صورت کج در برابر جریان آب می‌باشد؛ که با توجه به پیشرفت فن‌آوری طراحی و ساخت سازه‌های غیرمعمول در مهندسی عمران، احتمال ساخت این‌گونه سازه‌ها در موقعیت‌های مکانی و یا معماری خاص وجود داشته (شکل ۱-۲) و همچنین مجهول بودن اثرات آن به‌عنوان یک پدیده بر رفتار جریان سه بعدی حول پایه، سبب جلب توجه محققین برای بررسی آن گردیده است.



شکل (۱-۲): پل ساخته شده با پایه‌های کج در صفحه عمود بر جریان در کشور تایوان (Melville & Coleman, 2000)

### ۱-۳- هدف از انجام این تحقیق

این تحقیق بر مبنای نتایج مدل عددی استوار است. آنچه در این تحقیق به دنبال آن هستیم عبارت است از:

- ۱) شبیه‌سازی عددی الگوی جریان حول پایه پل قائم.
- ۲) مدل‌سازی عددی اثر پایه‌های پل کج (در جهات مختلف).
- ۳) مقایسه الگوی جریان حول پایه پل قائم حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی تحقیق انجام شده توسط آقای سلیمی در دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۷).
- ۴) بررسی اثر تغییر زاویه پایه پل بر الگوی جریان.

### ۱-۴- معرفی فصول پایان نامه

پایان نامه حاضر در پنج فصل به‌صورت زیر تنظیم شده است:

فصل اول: کلیات تحقیق شامل مقدمه، ضرورت انجام تحقیق و هدف از انجام این تحقیق.

فصل دوم: مطالعات نظری شامل مفاهیم اساسی در پدیده آبشستگی و الگوی جریان و عوامل مؤثر بر این پدیده و راهکارهای حفاظتی و همچنین مروری بر چگونگی مکانیزم و الگوی جریان حول پایه و مطالبی از تحقیقات گذشتگان.

فصل سوم: معرفی نرم افزار مورد استفاده برای شبیه‌سازی الگوی جریان و روش‌های موجود برای حل معادلات حاکم بر جریان و مدل‌های آشفتگی مختلف.

فصل چهارم: شبیه‌سازی عددی الگوی جریان حول پایه پل قائم و پایه پل کج در جهات مختلف با زوایای گوناگون. مقایسه کمی و کیفی نتایج عددی پایه پل قائم با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی آقای سلیمی در دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۷) و صحت‌سنجی نتایج مدل عددی در این فصل ارائه شده است.

فصل پنجم: خلاصه نتایج و پیشنهادات برای ادامه کار تحقیق.



فصل دوم:

مطالعات نظری

و

مروری بر تحقیقات گذشته

## فصل دوم: مطالعات نظری و مروری بر تحقیقات گذشته

### ۱-۲- مقدمه

راه‌ها از جمله شریان‌های حیاتی یک کشور هستند و پل‌ها یکی از مهم‌ترین سازه‌های معمول در راه‌ها به حساب می‌آیند که در صورت خرابی آنها، به‌ویژه در مواقع بحرانی مانند وقوع سیلاب، شریان‌های حیاتی ارتباطی قطع شده و مشکلات فراوانی را موجب می‌شوند. طبق آمارهای ارائه شده توسط کشورهای مختلف می‌توان گفت اکثر تخریب پل‌ها نه در اثر ضعف‌های سازه‌ای، بلکه در زمان‌های وقوع سیلاب و در اثر وقوع پدیده آبستگی در اطراف پایه‌ها رخ می‌دهند. بنابراین شناخت فرآیند آبستگی اطراف پایه‌های پل از اهمیت بالایی برخوردار است. شکل‌گیری حفره آبستگی در اطراف سازه‌های آبی کاملاً در تعامل با شاخصه‌های الگوی جریان و امواج در اطراف پایه می‌باشند. با توجه به پیچیده بودن جریان اطراف این‌گونه سازه‌ها و تأثیر آنها بر تنش برشی بستر، اهمیت بررسی این پدیده‌ها بیش از پیش نمایان می‌گردد.

### ۲-۲- انواع آبستگی

برای حل دقیق جریان و پیش‌بینی آبستگی در اطراف پایه‌های پل، نیاز به فهم دقیق الگوی جریان در اطراف آنها می‌باشد. بنابراین به‌صورت خلاصه به بررسی پدیده آبستگی پرداخته می‌شود. محققین به‌منظور بررسی دقیق‌تر این پدیده، آن را به انواع مختلفی تقسیم کرده‌اند، که در مهندسی رودخانه اجمالاً به‌صورت شکل (۱-۲) طبقه‌بندی شده است. در ادامه به تشریح هر یک از آنها پرداخته می‌شود.

### ۱-۲-۲- آبستگی عمومی

آبستگی عمومی عبارتست از فرسایشی که در اثر افزایش تنش برشی وارد بر بستر و دیواره در طول آبراهه از طرف جریان وارد می‌شود. علت این افزایش تنش برشی می‌تواند افزایش دبی و سرعت جریان باشد. زمانی که سرعت جریان از سرعت آستانه حرکت رسوبات بستر و دیواره‌ها در طول آبراهه تجاوز نماید، این فرسایش رخ می‌دهد. این نوع آبستگی عمدتاً حاصل از تغییرات طبیعی می‌باشد که در رودخانه به‌وقوع می‌پیوندد. آبستگی عمومی خود به دو حالت بلند مدت و کوتاه‌مدت تقسیم می‌گردد.

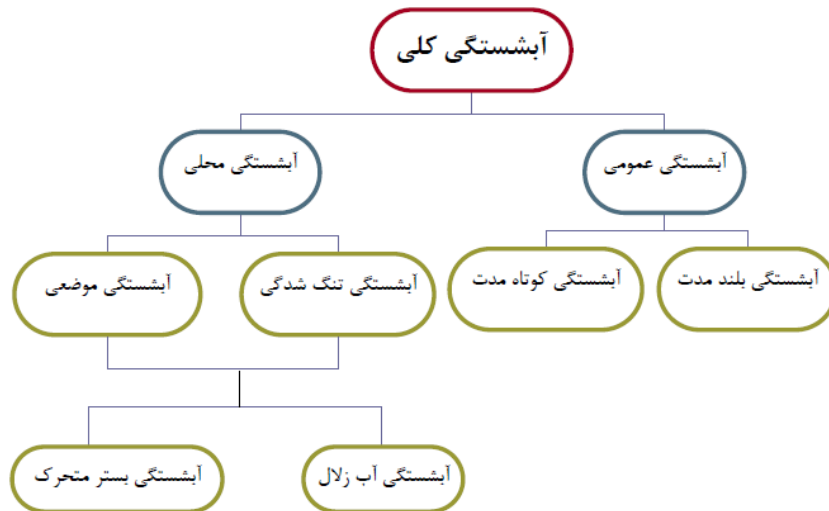
### ۱-۱-۲-۲- آبستگی عمومی بلند مدت<sup>۱</sup>

در صورتی که آبستگی عمومی ذکر شده در بند قبلی در طول یک دوره بلند مدت در حد چندین سال رخ دهد، به آن آبستگی عمومی بلند مدت گفته می‌شود. به‌عنوان مثال می‌توان به شکل‌گیری مائدرها، جابه‌جایی رودخانه در پلان، گسترش عرضی آبراهه و . . . اشاره نمود.

<sup>1</sup> Long-Term General Scour

## ۲-۱-۲-۲- آبستگي عمومي کوتاه مدت<sup>۲</sup>

در حالتی که فرسایش عمومی در طول یک دوره زمانی کوتاه، مثلاً رخداد یک سیلاب انجام شود، به آن آبستگي عمومي کوتاه مدت گفته می‌شود.



شکل (۱-۲): تقسیم‌بندی انواع آبستگي

## ۲-۲-۲- آبستگي محلي<sup>۳</sup>

هنگامی که فرسایش در منطقه محدودی از آبراهه به وقوع بپیوندد، به آن آبستگي محلي گفته می‌شود. این نوع آبستگي که عمدتاً حاصل ایجاد تغییرات موضعی توسط انسان در مسیر رودخانه‌ها می‌باشد، خود به دو دسته کلی آبستگي ناشی از تنگ‌شدگي و آبستگي موضعی تقسیم می‌شود.

### ۱-۲-۲-۲- آبستگي تنگ‌شدگي<sup>۴</sup>

هر گونه تنگ‌شدگي در سطح مقطع آبراهه می‌تواند باعث افزایش سرعت جریان در آن ناحیه خاص شده، در نتیجه ظرفیت حمل رسوب جریان افزایش یافته و در آن ناحیه بستر آبراهه دچار فرسایش گردد. این تنگ‌شدگي می‌تواند به دلایل مختلف از جمله قرارگيري سازه‌هاي ساخته شده در محل باشد. به عنوان مثال در محل احداث پل‌ها معمولاً عرض رودخانه را کاهش می‌دهند. همچنین وجود پایه‌هاي متعدد قرار گرفته داخل جریان به این وضعیت دامن می‌زند. این کاهش عرض سبب افزایش سرعت جریان و ایجاد فرسایش در محل تنگ‌شدگي می‌شود، تا جایی که سطح مقطع جریان آنقدر افزایش می‌یابد تا از ظرفیت حمل رسوب داخل جریان در آن ناحیه کاسته شده و برابر با ظرفیت حمل رسوب جریان در مسیر طبیعی رودخانه گردد. این افزایش سطح مقطع اجباراً از طریق فرسایش کف و در نتیجه افزایش عمق صورت می‌پذیرد که حائز اهمیت است.

<sup>2</sup> Short-Term General Scour

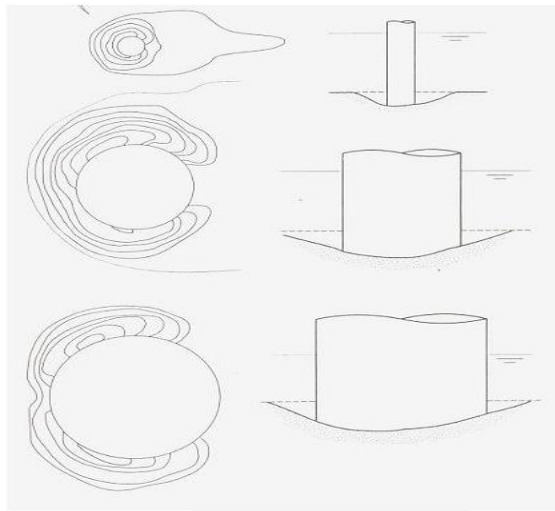
<sup>3</sup> Localised Scour

<sup>4</sup> Contraction Scour

## ۲-۲-۲-۲- آبستگي موضعي ° و عوامل ايجاد سيستم‌هاي گردابي در پايه‌ها

الگوی جریان در نزدیکی یک پایه پل تقریباً پیچیده بوده و توسط محققان متعددی از جمله ملویل<sup>۵</sup> (۱۹۷۵)، ملویل و رادکیوی<sup>۷</sup> (۱۹۷۷)، جورس<sup>۸</sup> (۱۹۷۲)، وین<sup>۹</sup> و همکاران (۱۹۷۵)، سانترو<sup>۱۰</sup> و همکاران (۱۹۹۱)، کوان<sup>۱۱</sup> (۱۹۸۸)، درگاهی<sup>۱۲</sup> (۱۹۸۷، ۱۹۸۹ و ۱۹۹۰)، احمد<sup>۱۳</sup> و راجاراتنام<sup>۱۴</sup> (۱۹۹۸)، کوان و ملویل (۱۹۹۴)، پارولا<sup>۱۵</sup> و همکاران (۱۹۹۴) و ایتیم<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۰۰) به تفصیل توصیف گردیده است. بخش‌های اصلی شامل گردابه‌های برخاستگی و گردابه‌های نعل اسبی ترکیب‌شده با جریان رو به پائین هستند. محور گردابه‌های نعل اسبی، افقی بوده و دور پایه به شکل یک نعل اسب می‌پیچد. سیستم گردابه برخاسته محورهای قائم داشته و عموماً به‌صورت چرخه‌ها دیده می‌شوند.

هندسه پایه پل تأثیراتی قابل ملاحظه بر الگوی جریان دارد، که بازتاب توانمندی گردابه نعل اسبی در محل پل می‌باشند (شکل ۲-۲).



شکل (۲-۲): الگوی آبستگي

در اثر عبور جریان از مقطع زیر پل و برخورد جریان به پایه‌ها و کوله‌ها، اغتشاش جریان و سیستم‌های گردابی اطراف پایه‌ها و کوله‌ها تشکیل می‌گردد. دو عامل برخورد و جدایی جریان اطراف پایه باعث ایجاد سیستم گردابی در اطراف پایه می‌شوند، که هر کدام از این دو عامل باعث اثرات تخریبی بستر و ایجاد گردابه‌ها و آبستگي در اطراف پایه‌ها و کوله‌ها می‌شوند.

<sup>5</sup> Local Scour

<sup>6</sup> Melville

<sup>7</sup> Raudkivi

<sup>8</sup> Hjorth

<sup>9</sup> Wen

<sup>10</sup> Santoro

<sup>11</sup> Kwan

<sup>12</sup> Dargahi

<sup>13</sup> Ahmed

<sup>14</sup> Rajaratnam

<sup>15</sup> Parola

<sup>16</sup> Ettema