

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشکده مهندسی کشاورزی

رشته مهندسی کشاورزی گرایش سازه های آبی

پایان نامه کارشناسی ارشد

**مدل سازی آبشستگی تکیه گاه پل با استفاده از مدل عددی**

نگارنده: مجتبی میرزانبی خانی

اساتید راهنما:

دکتر صمد امامقلی زاده

دکتر خلیل اژدری

استاد مشاور:

دکتر حسین خزیمه نژاد

شهریور ۹۵

دانشگاه شاهرود

دانشکده کشاورزی

گروه : آب و خاک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم مجتبی میرزانبی خانی به شماره دانشجویی: ۹۲۱۴۰۳۴

تحت عنوان : مدل سازی آبستگي تکیه گاه پل با استفاده از مدل عددی

مورد ارزیابی و با

در تاریخ ۱۳۹۵/۰۶/۱۴ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد درجه ..... بسیار خوب ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	حسین خزیمه نژاد		صمد امامقلی زاده
			خلیل ازدری

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	وجیهه درستکار		سید حسین حسینی
			زهرا گنجی نوروزی

تقدیم بہ

حجتہ ابن الحسن المہدی (عج)

کہ ولی نعمت تمام ہستی و سبب استقرار آسمان ہا و زمین است۔

## تشکر و قدردانی

بر خود وظیفه می‌دانم بدین وسیله مراتب تقدیر و تشکر خود را از دکتر صمد امامقلی زاده و دکتر خلیل اژدری که مسئولیت راهنمایی این پایان‌نامه را پذیرفتند، ابراز نمایم.

همچنین از زحمات دکتر حسین خزیمه‌نژاد و دکتر سید محمدهادی مشکاتی کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب مجتبی میرزایی خانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی گروه آب و خاک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان‌نامه **مدل‌سازی آبشستگی تکیه‌گاه پل با استفاده از مدل عددی** تحت راهنمایی دکتر صمد امامقلی زاده و دکتر خلیل ازدری متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### امضای دانشجو

### تاریخ

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان‌نامه وجود داشته باشد.

## چکیده

یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب پل‌های واقع در روی رودخانه‌ها آبشستگی پایه و تکیه‌گاه پل می‌باشد. یکی از روش‌های بررسی نحوه آبشستگی تکیه‌گاه پل مدل‌سازی آبشستگی در آزمایشگاه می‌باشد. امروزه محققین با توجه به محدودیت‌هایی که در کارهای آزمایشگاهی وجود دارد توجه زیادی به مدل‌سازی عددی نموده‌اند. در این تحقیق از نتایج آزمایشگاهی خزیمه‌نژاد و همکاران (۱۳۹۱) برای شبیه‌سازی مدل عددی Fluent استفاده گردید. در مدل آزمایشگاهی سرعت جریان با استفاده از سرعت‌سنج الکترومغناطیسی بعد از ۱ ساعت پس از شروع آبشستگی در ارتفاع ۹ سانتی‌متر از کف بستر که شامل ۱۵۶ نقطه اندازه‌گیری شد. برای انجام مدل‌سازی عددی، ابتدا هندسه بستر تثبیت شده در زمان ۱ ساعت پس از شروع آبشستگی توسط نرم‌افزار Gambit مش‌بندی شد و سپس سرعت جریان با استفاده از نرم‌افزار Fluent با مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  محاسبه و با مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که مانند مدل آزمایشگاهی بیشترین آبشستگی در گوشه بالادست تکیه‌گاه صورت گرفته است. میانگین قدر مطلق خطای (MAE) بین نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی برابر ۰/۹ cm بوده است. با توجه به میانگین عمق آبشستگی که برابر ۳/۳۱ cm بوده است در صد خطا برابر ۲۷٪ می‌باشد. نتایج مدل‌سازی نشان داد سرعت‌های محاسبه شده توسط مدل عددی Fluent با تقریب کمی برابر با سرعت‌های اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی می‌باشد. مهم‌ترین عامل آبشستگی افزایش سرعت افقی در جهت جریان می‌باشد که در اثر کاهش سطح مقطع جریان در تکیه‌گاه ایجاد شده است. همچنین نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که مقدار میانگین سرعت طولی جریان برابر ۲۴/۹۶ cm/s می‌باشد. مقدار میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و همچنین در صد خطا بین نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی برابر با ۲/۹۳ cm/s و ۱۲٪ می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: آبشستگی، تکیه‌گاه پل، فلوئنت، مدل آزمایشگاهی، مدل عددی.

## فهرست مقالات مستخرج از پایان نامه

- «مدل سازی عددی آبشستگی تکیه گاه پل با استفاده از فلوئنت و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی»، دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، شهریور ۹۵.
- «بررسی سرعت جریان در آبشستگی تکیه گاه پل در مدل عددی فلوئنت و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی»، دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، شهریور ۹۵.



# فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

---

## فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۲-۱- ضرورت تحقیق ..... ۳
- ۳-۱- اهداف تحقیق ..... ۵
- ۴-۱- ساختار پایان نامه ..... ۷

## فصل دوم: مروری بر مطالعات انجام شده

- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۰
- ۲-۲- آبستگي ..... ۱۰
- ۱-۲-۲- مفهوم آبستگي ..... ۱۰
- ۲-۲-۲- مراحل توسعه آبستگي ..... ۱۲
- ۳-۲-۲- انواع آبستگي ..... ۱۳
- ۱-۳-۲-۲- آبستگي عمومي ..... ۱۴
- ۲-۳-۲-۲- آبستگي موضعي ..... ۱۴
- ۳-۳-۲-۲- آبستگي كل ..... ۱۵
- ۴-۲-۲- آبستگي در آب زلال و آب حاوي رسوب ..... ۱۶

۱۶	..... ۵-۲-۲- آبشستگی استاتیکی و دینامیکی
۱۷	..... ۳-۲- تکیه‌گاه پل
۱۸	..... ۴-۲- مکانیسم جریان در اطراف تکیه‌گاه پل
۲۰	..... ۵-۲- الگوی جریان
۲۰	..... ۱-۵-۲- الگوی جریان در اطراف پایه پل
۲۱	..... ۲-۵-۲- الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه پل
۲۴	..... ۶-۲- بررسی پارامترهای مؤثر بر آبشستگی تکیه‌گاه پل
۲۵	..... ۷-۲- پارامترهای مؤثر در میزان آبشستگی
۲۵	..... ۸-۲- شکل تکیه‌گاه
۲۶	..... ۹-۲- عمق آبشستگی
۲۷	..... ۱۰-۲- تأثیر زمان بر آبشستگی
۲۹	..... ۱۱-۲- مدل عددی
۲۹	..... ۱-۱۱-۲- روش مدل‌سازی عددی با استفاده از Fluent
۳۰	..... ۲-۱۱-۲- انتخاب مش بندی مناسب
۳۱	..... ۳-۱۱-۲- انتخاب مدل آشفتگی

## فصل سوم: مواد و روش‌ها

۳-۱-۱- مدل آزمایشگاهی .....	۳۴
۳-۲- پارامترهای مؤثر در آبخستگی .....	۳۴
۳-۳- مدل آزمایشگاهی .....	۳۵
۳-۴- مراحل انجام مدل آزمایشگاهی .....	۳۷
۳-۵- آزمایش‌های سرعت‌سنجی و تعیین الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه .....	۳۹
۳-۵-۱- بررسی عمقی مؤلفه‌های سرعت در نقطه مبنا .....	۳۹
۳-۶- نتایج آبخستگی آزمایش‌ها .....	۴۱
۳-۷- مدل عددی .....	۴۵
۳-۷-۱- مدل عددی فلوئنت .....	۴۵
۳-۷-۲- مراحل مدل‌سازی با فلوئنت .....	۴۵
۳-۷-۲-۱- طراحی شبکه و مش بندی با نرم‌افزار پیش پردازنده .....	۴۵
۳-۷-۲-۲- وارد کردن شبکه ساخته شده توسط نرم‌افزار پیش پردازنده .....	۴۶
۳-۷-۲-۳- تعیین شرایط اولیه جریان .....	۴۶
۳-۷-۲-۴- تنظیم پارامترها .....	۴۶
۳-۷-۲-۵- شبیه‌سازی جریان و نتیجه‌گیری .....	۴۷
۳-۷-۳- گمبیت (Gambit) .....	۴۷

۳-۷-۱-۳	بخش‌های مختلف گمبیت (Gambit)	۴۷
۳-۷-۲-۳	مراحل کار با گمبیت	۴۹
۳-۷-۳-۳	نقاط ضعف گمبیت	۴۹
۳-۷-۴-۳	مراحل مدل‌سازی و تحلیل با Fluent	۵۰
۳-۷-۱-۴	مرحله اول: شبکه	۵۱
۳-۷-۲-۴	مرحله دوم: مدل	۵۲
۳-۷-۳-۴	مرحله سوم: مواد	۵۴
۳-۷-۴-۴	مرحله چهارم: تعیین فازها	۵۵
۳-۷-۵-۴	مرحله پنجم: تعیین شرایط اولیه جریان	۵۶
۳-۷-۶-۴	مرحله ششم: تعیین شرایط مرزی	۵۷
۳-۸-۳	نرم‌افزار Tecplot	۵۸

### فصل چهارم: بحث و نتایج

۴-۱-۱	مقدمه	۶۰
۴-۲-۲	داده‌های ورودی به مدل	۶۰
۴-۳-۳	عوامل مؤثر در مدل‌سازی عددی	۶۱
۴-۱-۳-۱	عوامل هیدرولیکی	۶۱

۶۲	..... ۲-۳-۴- عامل‌های سیال
۶۲	..... ۳-۳-۴- عامل‌های رسوب
۶۲	..... ۴-۳-۴- عامل‌های تراکنش بین رسوب و سیال
۶۳	..... ۴-۴- مدل‌سازی عددی آبشستگی با Fluent
۶۴	..... ۱-۴-۴- تعریف هندسه و مش بندی برای آبشستگی
۶۶	..... ۲-۴-۴- تعیین شرایط مرزی
۶۶	..... ۳-۴-۴- مدل آشفنگی در آبشستگی
۶۷	..... ۴-۴-۴- مراحل مدل‌سازی عددی در فلوننت برای آبشستگی
۶۸	..... ۵-۴-۴- مراحل برداشت اطلاعات از فلوننت
۶۸	..... ۶-۴-۴- نتایج برداشت عمق آبشستگی
۶۹	..... ۵-۴-۴- سرعت‌سنجی با مدل عددی فلوننت
۷۰	..... ۱-۵-۴- تعریف هندسه کانال و مش بندی برای سرعت‌سنجی
۷۱	..... ۲-۵-۴- مدل آشفنگی سرعت‌سنجی
۷۱	..... ۳-۵-۴- مراحل مدل‌سازی عددی در فلوننت برای سرعت‌سنجی
۷۳	..... ۴-۵-۴- نتایج سرعت طولی
۷۵	..... ۵-۵-۴- نتایج سرعت عرضی

۶-۵-۴- نتایج سرعت عمقی .....	۷۶
۶-۴- بررسی عمقی مؤلفه‌های سرعت در نقطه مبنا در فلوئنت .....	۷۷
۷-۴- بررسی الگوی جریان در نیم‌رخ‌های عمودی پیرامون تکیه‌گاه .....	۷۹
۸-۴- جمع بندی نتایج مدل‌سازی .....	۸۲

### فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۵- نتایج .....	۸۶
۱-۱-۵- نتایج آبستگي .....	۸۶
۲-۱-۵- نتایج سرعت‌سنجی .....	۸۶
۲-۵- پیشنهادات .....	۸۷
۱-۲-۵- پیشنهادات مدل عددی Fluent .....	۸۷
۲-۲-۵- پیشنهادات در مورد آبستگي .....	۸۷
فهرست منابع .....	۸۸

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲- آبشستگی موضعی پایین دست برخی از سازه‌های هیدرولیکی	۱۱
شکل ۲-۲- مراحل توسعه حفره آبشستگی	۱۳
شکل ۳-۲- انواع آبشستگی	۱۵
شکل ۴-۲- انواع تکیه‌گاه	۱۷
شکل ۵-۲- فرسایش جداره و بستر رودخانه در اطراف تکیه‌گاه پل در یک رودخانه	۱۸
شکل ۶-۲- الگوی جریان اطراف پایه پل	۲۰
شکل ۷-۲- الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه	۲۲
شکل ۸-۲- جریان در اطراف تکیه‌گاه	۲۳
شکل ۹-۲- روند آبشستگی با توجه به عوامل آبشستگی	۲۸
شکل ۱-۳- الف) فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش	۳۶
شکل ۱-۳- ب) مقطع آزمایش	۳۶
شکل ۲-۳- الف) سرعت‌سنج الکترومغناطیس و تجهیزات مربوطه	۳۸
شکل ۲-۳- ب) نحوه اندازه‌گیری سرعت بر روی بستر تثبیت شده به‌وسیله دوغاب سیمان	۳۸
شکل ۳-۳- موقعیت نقاط اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه بعدی سرعت در یکی از اعماق جریان	۳۸
شکل ۴-۳- الف) نقطه مبنا محل اندازه‌گیری سرعت و ب) پلان از نمای مقابل	۴۰
شکل ۵-۳- پروفیل سرعت در نقطه مبنا(گوشه بالادست تکیه‌گاه)	۴۰

- شکل ۳-۶-الف) پراکندگی خطوط جریان در اثر گرداب ایجاد شده در نقطه مبنا از نمای مقابل ... ۴۱
- شکل ۳-۶-ب) انحراف خطوط جریان در اثر ایجاد سرعت عرضی از نمای بالا..... ۴۱
- شکل ۳-۷- تغییر عمق آبشستگی در مقابل زمان بدون حضور طوقه در  $Fr = 0/22$  ..... ۴۳
- شکل ۳-۸- الگوی فرسایش و رسوب گذاری پیرامون تکیه‌گاه در عدد فرود  $0/22$  ..... ۴۴
- شکل ۳-۹- پروفیل رسوبات بستر پیرامون تکیه‌گاه در شرایط مختلف جریان ..... ۴۴
- شکل ۳-۱۰- نمای کلی نرم افزار Gambit ..... ۴۸
- شکل ۳-۱۱- نمای کلی نرم افزار Fluent ..... ۵۰
- شکل ۳-۱۲- صفحه تنظیمات هندسه و مش تعریف شده ..... ۵۱
- شکل ۳-۱۳- صفحه تعیین نوع پایداری و سه بعدی بودن جریان ..... ۵۲
- شکل ۳-۱۴- صفحه تعیین نوع تحلیل و تعداد فاز ..... ۵۳
- شکل ۳-۱۵- صفحه تعیین نوع ویسکوزیته و خصوصیات آن ..... ۵۴
- شکل ۳-۱۶- صفحه تعیین سیال و مواد در Fluent ..... ۵۵
- شکل ۳-۱۷- صفحه تعیین فازها ..... ۵۵
- شکل ۳-۱۸- صفحه تعیین فاز اولیه و ثانویه ..... ۵۶
- شکل ۳-۱۹- صفحه تعیین شرایط گرانس زمین و جهت آن و شیب کانال ..... ۵۶
- شکل ۳-۲۰- صفحه تعیین شرایط مرزی ..... ۵۷
- شکل ۳-۲۱- صفحه تعیین دبی ورودی جریان ..... ۵۷
- شکل ۴-۱- نمای نقاطی که در آنها عمق آبشستگی اندازه گیری شده است ..... ۶۳
- شکل ۴-۲- نمودار عمق آبشستگی در ۱۷۱ نقطه در شرایط  $Fr = 0/22$  ..... ۶۸
- شکل ۴-۳- طراحی بستر تثبیت شده پس از آبشستگی در Gambit ..... ۷۰



- شکل ۴-۴- نمای نقاط سرعت سنجی پیرامون یک تکیه‌گاه پل ..... ۷۲
- شکل ۴-۵- سرعت افقی جریان در اطراف تکیه‌گاه در بستر تثبیت شده در فلونت ..... ۷۳
- شکل ۴-۶- نمودار سرعت طولی در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی Fluent  $MAE = ۲/۹۳$  ..... ۷۴
- شکل ۴-۷- نمودار سرعت عرضی در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی Fluent  $MAE = ۲/۷۷$  ..... ۷۵
- شکل ۴-۸- نمودار سرعت عمقی در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی Fluent  $MAE = ۵/۱۲$  ..... ۷۶
- شکل ۴-۹- نمودار سرعت جریان در نقطه مبنا در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی فلونت ..... ۷۸
- شکل ۴-۱۰- میدان جریان اطراف تکیه‌گاه ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۱- میدان جریان اطراف تکیه‌گاه در نیم‌رخ ..... ۸۲

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۲۴	جدول (۱-۲) پارامترهای مؤثر بر آبشستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه پل .....
۲۷	جدول (۲-۲) معادلات ارائه شده برای آبشستگی موضعی تکیه‌گاه پل تحت شرایط آب زلال .....
۳۲	جدول (۳-۲) نتایج حاصل از آنالیز جریان برای مدل‌های اغتشاش مختلف .....
۸۳	جدول (۱-۴) جمع بندی نتایج مدل سازی عددی و مقایسه با مدل آزمایشگاهی .....

## فهرست علائم و نشانه‌های اختصاری به کار رفته در پایان نامه

$d_s$	عمق آبشستگی
$h_0$	عمق متناظر با نقطه عطف نمودار مراحل توسعه آبشستگی
$t$	زمان آبشستگی
$t_1$	زمان متناظر با نقطه عطف نمودار مراحل توسعه آبشستگی
$t_{s_e}$	عمق آبشستگی تعادلی
$y_s$ و $t_{s_{max}}$	عمق آبشستگی ماکزیمم
$Q$	دبی جریان
$q$	دبی در واحد عرض جریان
$L_a$	طول تکیه
$\alpha$	زاویه برخورد جریان با تکیه‌گاه
$\phi_1$ و $k_s$	ضریب فاکتور شکل تکیه‌گاه
$y$	عمق نرمال جریان
$V$	سرعت متوسط جریان
$V_0$	سرعت آستانه حرکت ذرات رسوب
$V_c$	سرعت بحرانی جریان
$g$	شتاب ثقل زمین

B	عرض کانال
$B_a$	عرض تکیه‌گاه
$S_e$	شیب خط انرژی
$S_0$	شیب کانال
$K_g$	هندسه کانال
$\rho$	جرم مخصوص
$G_s$ و $\rho_s$	جرم مخصوص رسوب
$\mu$	لزجت دینامیکی سیال
T	درجه حرارت
$d_s$	قطر متوسط ذرات
$K_u$	ضریب ثابت در سیستم متریک ۱ و در سیستم انگلیسی ۱/۸۱
$S_s$	چگالی ویژه ذرات
$\sigma_g$	انحراف معیار استاندارد
W	سرعت سقوط ذرات بستر
$S_p$	فاکتور شکل ذرات بستر
$\varphi$	زاویه ایستایی ذرات بستر
C	چسبندگی ذرات بستر
$\theta_c$	تنش برشی بحرانی بی بعد شیلدز ذرات بستر

Fr	عدد فرود
Re	عدد رینولدز
Re*	رینولدز برشی ذرات
MAE	میانگین قدر مطلق خطا



# فصل اول:

## مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین مسائل مورد توجه جامعه مهندسين، مدیریت سازه‌ها است. از جمله آن سازه‌هایی است که با آب ارتباط دارند. این سازه‌ها شامل سد، پل‌های روی رودخانه، موج‌شکن، اسکله و انواع سرریزها و... می‌باشند. در همین راستا، یکی از مسائلی که مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته نحوه تأثیر آب و سازه بر یکدیگر است. تحقیقات زیاد و گسترده‌ای پیرامون ارتباط آب و سازه و همچنین میزان تأثیر آن دو بر یکدیگر صورت گرفته است. با توجه به اهمیت تحقیق در زمینه‌ی سازه‌های آبی لازم است تا تمام جوانب مربوط به تأثیرات آب و سازه به دقت مورد بررسی قرار گیرد تا در شرایط مختلف بتوان با بهترین بهره‌وری از آنها استفاده نمود. تعیین میزان اثرات آب و سازه بر یکدیگر به منظور طراحی‌های مطلوب‌تر و بهره‌برداری هرچه بهتر و ایمن‌تر از سازه‌ها و یا کنترل اثرات تخریبی سیلاب‌ها و امواج است. مهم‌ترین سازه‌هایی که تماس زیادی با آب دارند پل‌ها هستند که کاربرد زیادی در زندگی جوامع بشری دارند. از جمله این کاربردها احداث پل در محل تقاطع جاده و رودخانه و یا پل‌های ارتباطی بین دو شهر در دو طرف دریاچه و یا پل‌هایی است که به منظور عبور خطوط ریلی می‌باشند. این پل‌ها دارای پایه و تکیه‌گاه‌هایی می‌باشند که در بستر یا کناره رودخانه ساخته شده‌اند و در معرض تماس با آب می‌باشند و به مرور زمان تحت تأثیر آبشستگی، مقاومت اولیه خود را از دست می‌دهند.

پل‌ها یکی از سازه‌های تأثیرگذار در هیدرولیک و مورفولوژی رودخانه‌ها می‌باشند. وجود پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها در عرض رودخانه باعث کاهش مقطع عبوری جریان، برخورد جریان به پایه و تکیه‌گاه و در نتیجه انحراف خطوط جریان اطراف پایه به کف بستر و تشکیل گرداب‌های نعل اسبی، چرخشی و برخاستگی می‌شود که یکی از عوامل مؤثر در پدیده آبشستگی موضعی پایه و تکیه‌گاه پل‌ها است. سالانه بسیاری از پل‌ها در اثر پدیده آبشستگی و لغزش پایه‌ها در مواقع سیلابی که جریان‌های



ارتباطی به مناطق سیل‌زده هستند تخریب می‌شوند و دسترسی و امدادسانی به مناطق سیل‌زده با مشکلات مواجه می‌شود که بیانگر اهمیت بررسی این پدیده است (محجوب و همکاران، ۱۳۹۲).

تاکنون مطالعات زیادی در خصوص شناخت مکانیسم آبشستگی اطراف سازه‌های هیدرولیکی به‌خصوص پل‌ها انجام شده و روش‌هایی نیز جهت کنترل یا کاهش آبشستگی در اطراف آنها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌اند. در زمینه‌ی آبشستگی اطراف پل‌ها تمرکز تحقیقات بیشتر بر روی پایه بوده است تا تکیه‌گاه، در حالی که بررسی آمار موجود بر روی شکست پل‌ها نشان می‌دهد که بیشتر مشکلات، مربوط به تکیه‌گاه بوده و در نتیجه هزینه‌های بیشتری نیز در این بخش صرف شده است (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۱).

## ۱-۲- ضرورت تحقیق

امروزه اساس تئوری طراحی سازه‌های پل‌ها فوق‌العاده پیشرفت کرده است، اما برآورد دقیق عمق فرسایش اطراف پایه‌ها هنوز موضوع تحقیق می‌باشد که دلیلی اصلی آن طبیعت پیچیده مسأله فرسایش است. می‌توان گفت اکثر روش‌های برآورد عمق فرسایش اطراف پایه‌ها مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی است. اهمیت بررسی موضوع آبشستگی پایه‌های پل با ذکر این مطلب روشن می‌شود که بدانیم میلیون‌ها پل در سطح جهان وجود دارد (بیش از هزاران عدد از این پل‌ها در کشور ماست) که به دلیل وقوع سیلاب‌های سالانه، آبشستگی در اطراف پایه‌های آنها پدیدار شده و احتمال تخریب آنها در صورتی که برای محافظت از آنها طرحی اندیشیده نشده باشد حتمی است. این مطلب وقتی بحرانی‌تر می‌شود که بدانیم پل‌ها درست زمانی تخریب می‌شوند که ما بیشترین احتیاج را به راه‌های دسترسی جهت کمک به آسیب دیدگان از بلایای طبیعی داریم (به عنوان مثال در مواقع سیلابی). بنابراین به غیر از مسأله اقتصادی، مسأله حفاظت پل‌ها در برابر آبشستگی یک موضوع انسانی اجتماعی است. شاید به همین دلیل این مسأله بعد از جنگ جهانی دوم بیش از پیش مورد توجه

محققین قرار گرفته است. به جز چند تحقیق مختصر که قبل از جنگ جهانی بر روی آبشستگی و روش‌های محافظت در برابر آن انجام شد، اوج تحقیقات در این زمینه طی چهار دهه اخیر بوده است. رودخانه‌ها سالیان متمادی در جریان بوده‌اند و مانند هر سیستم طبیعی دیگر در خلال جریان خود به سمت تعادل پیشرفته‌اند. تعادل رودخانه زمانی است که میزان رسوب ورودی و خروجی در هر بازه از آن با یکدیگر مساوی باشد. رودخانه به‌طور طبیعی برای رسیدن به چنین حالتی، رفتارهایی را از خود نشان می‌دهد که در نهایت منجر به تعادل فیزیکی آن می‌گردد. با این وجود سیلاب‌های سالانه عامل مهمی در برهم زدن این سیستم بوده و سالانه مقدار زیادی از فرسایش در مسیر رودخانه را باعث می‌شود. در این میان جنس بستر، شیب رودخانه، ابعاد مقطع و میزان دبی عواملی هستند که هر کدام دارای نقشی در تعیین شکل رودخانه می‌باشند. پدیده آبشستگی زمانی اتفاق می‌افتد که به هر دلیل تنش برشی بین جریان آب بستر و دیواره آبراهه از میزان لازم جهت حرکت ذرات تشکیل دهنده مقطع بیشتر شود (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۴).

مطالعات نشان می‌دهد که یکی از مهم‌ترین دلایل تخریب پل‌ها پدیده‌ی آبشستگی است که علاوه بر تلفات جانی، هزینه‌های زیادی را به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر کشورها تحمیل می‌کند. مطالعات انجام شده بر روی شکست ۳۸۳ پل در ایالات متحده نشان می‌دهد که در ۲۵ درصد آنها تخریب پایه و در ۷۲ درصد تخریب تکیه‌گاه علت شکست پل بوده است (Melville 1992).

بر طبق مطالعات ایشان، از ۱۰۸ مورد شکست پل که در فاصله‌ی سال‌های ۱۹۴۸ تا ۱۹۶۰ در نیوزیلند رخ داد، ۲۹ مورد آن مربوط به آبشستگی تکیه‌گاه پل بوده است. همچنین خاطرنشان می‌سازد که ۷۰ درصد هزینه‌های شکست پل در نیوزیلند ناشی از آبشستگی تکیه‌گاه پل بوده است (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۱).

موضوعی که توجه محققان زیادی را به‌منظور محافظت از سازه‌های آبی به خود جلب کرده آبشستگی سازه‌های آبی می‌باشد. روش‌ها و معادلات زیادی برای تعیین و پیش‌بینی میزان آبشستگی ارائه شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌ها مدل‌سازی جریان به‌منظور بررسی و نحوه عملکرد سازه و جریان قبل

از ساخت سازه اصلی است. اما این روش با مشکلات زیادی از جمله هزینه زیاد و طولانی بودن مدت ساخت مدل‌های هیدرولیکی مواجه است. علاوه بر این مشکلات، مدل‌ها فقط ابعاد خاص و محدودی را شامل می‌شوند و قابلیت تغییر در فاکتورهای آنها یا اصلاً ممکن نیست و یا اینکه بسیار محدود است.

راه حلی که به منظور برطرف کردن این مشکلات در مسیر مدل‌سازی و بررسی شرایط جریان و تأثیر آب و سازه وجود دارد مدل‌سازی عددی است. در مدل‌سازی عددی با کمک گرفتن از نرم‌افزارهای مختلف، پیشرفت‌های زیادی در برداشتن مشکلات مدل‌سازی صورت گرفته است.

### ۱-۳- اهداف پایان‌نامه

در این تحقیق در نظر داریم یکی از مدل‌های آزمایشگاهی که به منظور بررسی میزان آبشستگی تکیه-گاه پل طراحی و اجرا شده را با مدل عددی فلوئنت مدل‌سازی کنیم. بدین منظور ابتدا الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه پل مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت با مقایسه نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی، مدل عددی را کالیبره کرده و بهترین مقادیر برای فاکتورهای مدل‌سازی عددی را در Fluent مدل‌سازی کرده‌ایم. همچنین با بررسی سرعت جریان در سه جهت طولی، عرضی و عمقی حین آبشستگی به بررسی علل آبشستگی پرداخته شده است. در ادامه مفاهیمی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد به صورت مختصر شرح داده می‌شود.

آبشستگی در سازه پل شامل همه انواع آن اعم از آبشستگی عمومی، آبشستگی تنگ‌شدگی و آبشستگی موضعی می‌باشد. البته حفره‌ای که در اطراف تکیه‌گاه و پایه‌های پل ایجاد می‌شود از نوع آبشستگی موضعی می‌باشد (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۴).

با توجه به حرکت رسوبات در جریان رودخانه آبشستگی به دو دسته آبشستگی آب زلال و آبشستگی بستر متحرک تقسیم می‌شود. بر اساس مطالعات انجام شده حداکثر عمق آبشستگی آب زلال ۱۰ درصد بیشتر از حداکثر عمق آبشستگی بستر متحرک می‌باشد (Day S, and Barbhuiya A, 2004). تکیه‌گاه از نظر شکل به سه دسته کلی تکیه‌گاه با دیوار قائم، تکیه‌گاه باله دار و تکیه‌گاه شیب‌دار تقسیم‌بندی می‌شوند (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۰).

از نظر شکل دماغه نیز تقسیم‌بندی‌های مختلفی برای تکیه‌گاه وجود دارد که در اینجا تکیه‌گاه دیوار قائم با دماغه مستطیلی مورد بررسی قرار گرفته است. تکیه‌گاه‌ها از نظر موقعیت نیز می‌توانند در سه حالت متفاوت قرار گیرند. حالت اول مربوط به تکیه‌گاه در کانال اصلی است، حالت دوم تکیه‌گاهی است که از سیلاب دشت شروع شده و تا داخل کانال اصلی ادامه پیدا می‌کند، حالت سوم تکیه‌گاه در سیلاب دشت واقع شده و می‌تواند در سیلاب دشت باشد یا تا ابتدای کانال اصلی ادامه یابد (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۰).

مدل اصلی این پایان‌نامه مدل آزمایشگاهی دکتر خزیمه‌نژاد (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲) می‌باشد. در این مدل آزمایشگاهی چند مدل آبشستگی و روش‌های کنترل آبشستگی مورد مطالعه قرار گرفته است. در همین راستا مدل اولیه آبشستگی دکتر خزیمه‌نژاد به وسیله مدل عددی فلوئنت مدل‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی بررسی فاکتورهای لازم برای مدل‌سازی عددی و سرعت‌سنجی است. عمق آبشستگی در ۱۷۱ نقطه در مدل عددی بدست آمده و با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. سرعت سنجی نیز در سه جهت طولی، عرضی و عمقی بدست آمده و با مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین با تحلیل سرعت در اطراف تکیه‌گاه به بررسی علل آبشستگی پرداخته شده و پیشنهادهایی ارائه گردیده است.

یکی از توانمندترین و هنرمندانه‌ترین نرم‌افزارهایی که بدین منظور طراحی شده فلوئنت (Fluent) می‌باشد. فلوئنت (Fluent) یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارها در زمینه‌ی مدل‌سازی سیالات در فضای

بسته، لوله‌های تحت فشار، مدل‌سازی دو فاز (مایع و گاز) دارای سطح آزاد و همچنین مدل‌سازی انتقال حرارت در اجسام می‌باشد. این نرم‌افزار توسط جمعی از مهندسين سيالات طراحی شده و دامنه زیادی از مدل‌سازی‌های سيالات را در بر می‌گیرد.

## ۱-۴- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل پنج فصل می‌باشد که در پی آن مآخذ و منابع ارائه شده است.

در فصل اول مقدمه، ضرورت تحقیق، اهداف تحقیق و خلاصه‌ای از فصل‌های پایان‌نامه ارائه شده است. در فصل دوم ابتدا کلیاتی از آبشستگی، آبشستگی در تکیه‌گاه پل و در ادامه، روند ایجاد آبشستگی و عوامل مؤثر در آبشستگی در تکیه‌گاه‌ها، ساختار تکیه‌گاه و همچنین مروری بر تحقیقات گذشته ارائه شده است.

فصل سوم در دو بخش ارائه شده است. در بخش اول مدل آزمایشگاهی دکتر خزیمه نژاد معرفی شده و در بخش دوم مدل عددی فلوئنت و نحوه مدل‌سازی با آنکه در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، بیان شده است.

فصل چهارم به بررسی و تحلیل داده‌های بدست آمده از مدل عددی پرداخته شده است. این فصل در دو بخش، مدل آزمایشگاهی را با مدل عددی مقایسه نموده است. در بخش اول عمق آبشستگی در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی فلوئنت و در بخش دوم سرعت جریان در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی مقایسه و نمودارها و شکل‌های آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

فصل پنجم شامل نتایج بدست آمده از مدل‌سازی بوده و برای تحقیقات بیشتر پیشنهادهایی ارائه گردیده است.



## **فصل دوم:**

### **مروری بر مطالعات انجام شده**

## ۲-۱- مقدمه

قبل از بیان هرگونه بررسی و تحلیل بر روی داده‌ها لازم است تا مطالعات انجام شده در موضوع مدل‌سازی آبشستگی تکیه‌گاه پل با استفاده از مدل عددی، مورد مطالعه قرار گیرد.

باید توجه داشت که مطالعات زیاد و با سابقه‌ای طولانی بر روی آبشستگی صورت گرفته است. این پدیده سالیان زیادی است که توجه محققین را به خود جلب کرده است. در این فصل با توجه به منابع موجود، مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه‌های آبشستگی، تکیه‌گاه پل، مدل آزمایشگاهی آبشستگی، مدل‌سازی عددی آبشستگی و مدل عددی فلونت صورت گرفته و در حد امکان تشریح گردیده است.

## ۲-۲- آبشستگی

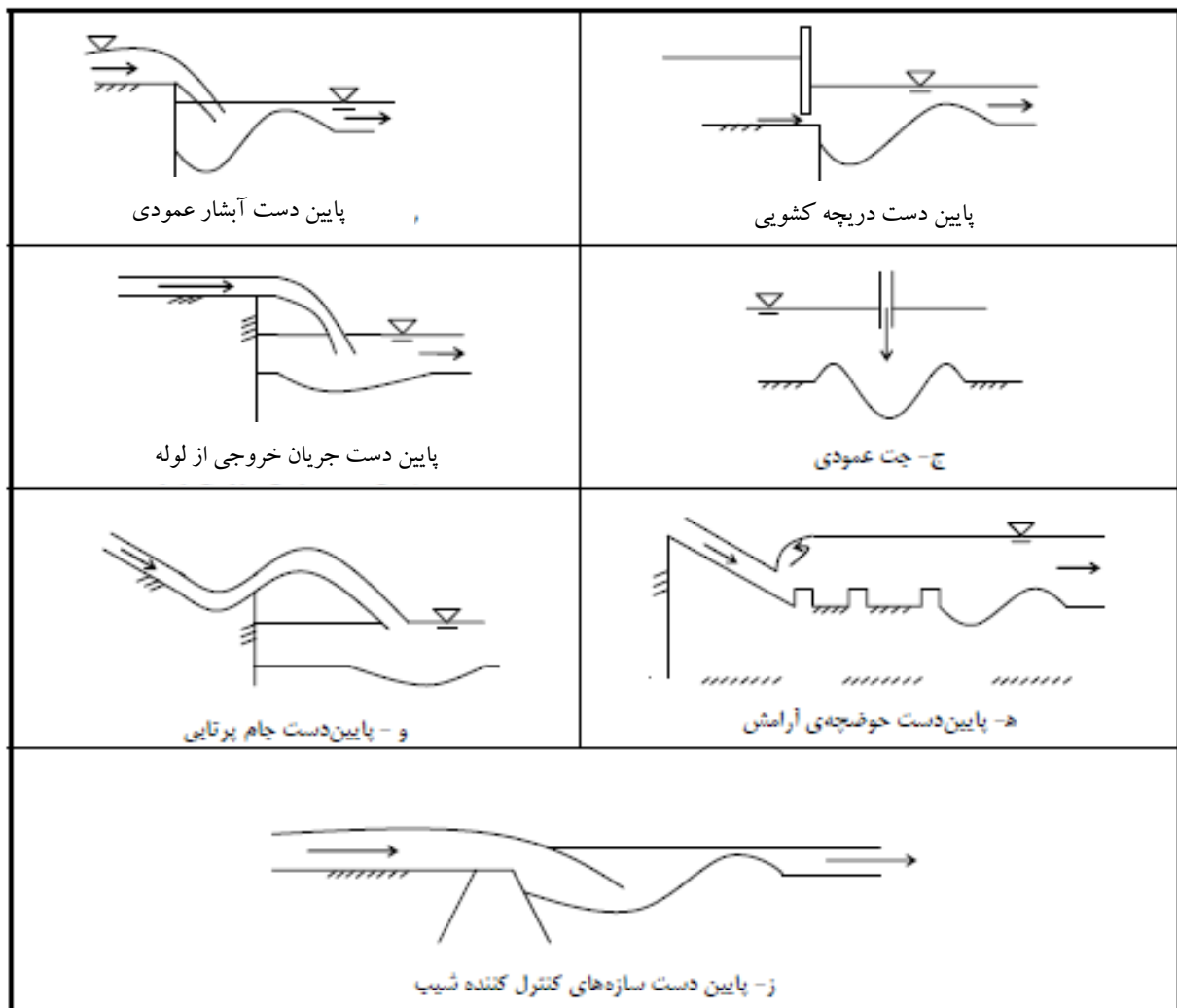
### ۲-۲-۱- مفهوم آبشستگی

آبشستگی در حقیقت جابجایی ذرات توسط جریان از محل استقرار اولیه آنها به مکان دیگری است. آبشستگی ممکن است در نتیجه تغییرات طبیعی جریان در آبراهه یا در نتیجه فعالیت‌های انسان مانند ساخت سازه‌ها در مسیر جریان یا برداشت مصالح بستر اتفاق افتد. به‌طور کلی آبشستگی در اثر اندرکنش نیروهای زیر حاصل می‌شود:

- ۱- نیروی محرک ناشی از جریان که در راستای جدا کردن ذره از بستر عمل می‌کند.
- ۲- نیروی مقاوم ناشی از اصطکاک ذرات و وزن ذره که در برابر حرکت ذره مقاومت کرده و مانع جدایی ذره از بستر می‌شود.



حرکت یک ذره هنگامی آغاز می‌شود که نیروهای اعمال شده توسط جریان یعنی نیروی کشسانی و بالابرنده که باعث جدا شدن ذره از بستر می‌شوند، بر نیروی مقاوم ذره غالب آید. در شکل (۱-۲) آبشستگی موضعی پایین دست برخی از سازه‌های هیدرولیکی نشان داده شده است (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۰).



## ۲-۲-۲- مراحل توسعه آبشستگی

بر اساس مطالعاتی که توسط محققینی نظیر بروسرز (۱۹۶۶)، دیتز (۱۹۶۹) و زنک (۱۹۷۸) انجام گرفته است، پدیده آبشستگی به طور کلی دارای چهار مرحله زیر است.

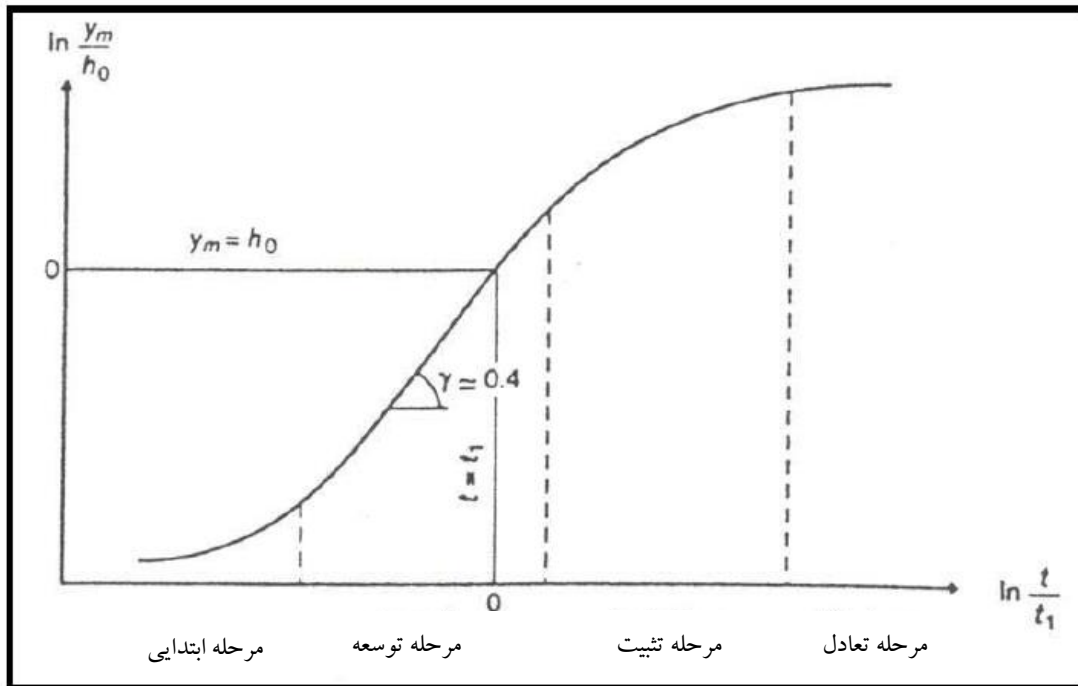
۱- مرحله ابتدایی

۲- مرحله توسعه

۳- مرحله تثبیت

۴- مرحله تعادل

مرحله اول ظرفیت آبشستگی بالایی دارد و حفره آبشستگی در این مرحله آغاز می شود. در مرحله دوم عمق و ابعاد حفره آبشستگی گسترش می یابد. در مرحله سوم روند تغییرات نیمرخ بستر کاهش می یابد. در این مرحله، دیواره پایین دست حفره آبشستگی دستخوش تغییرات محسوسی می شود. در مرحله چهارم که مرحله تعادل است تنها حرکت ذرات ممکن است درون حفره آبشستگی صورت گیرد به طوری که ذراتی که حرکت غلطشی دارند از درون حفره آبشستگی خارج نمی شوند. در این مرحله، با توجه به شرایط جریان، ممکن است حتی جابجایی ذرات نیز متوقف شود. هر کدام از مراحل آبشستگی در شکل نشان داده شده است. در شکل (۲-۲) مراحل توسعه آبشستگی نشان داده شده است که در آن  $t_1$  و  $t$ ،  $h_0$ ،  $y_m$  به ترتیب معادل عمق آبشستگی، عمق متناظر با نقطه عطف نمودار مراحل توسعه آبشستگی، زمان آبشستگی و زمان متناظر با نقطه عطف نمودار مراحل توسعه آبشستگی می باشد (معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۰).



شکل (۲-۲) مراحل توسعه حفره آبشستگی

### ۳-۲-۲- انواع آبشستگی

آبشستگی از جنبه‌های مختلف به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- آبشستگی از نظر علت به وجود آمدن آن که شامل آبشستگی عمومی، آبشستگی ناشی از تنگ‌شدگی مقطع و آبشستگی موضعی است. از مجموع این سه آبشستگی، عمق آبشستگی کل به دست می‌آید.
- آبشستگی از نظر وضعیت حمل رسوب، که شامل آبشستگی در حالت آب زلال و آبشستگی در حالت آب حاوی رسوب است.
- آبشستگی از نظر وضعیت ذرات رسوب در حفره آبشستگی شامل آبشستگی استاتیکی و دینامیکی می‌شود (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۰).

## ۲-۲-۳-۱- آبشستگی عمومی

این نوع آبشستگی زمانی رخ می‌دهد که جریان در بازه‌ای از رودخانه قادر باشد ذرات بستر را در طول مسیر جابجا و با خود حمل کند که باعث کاهش تراز بستر رودخانه در همان بازه می‌شود.

آبشستگی عمومی شامل موارد زیر می‌شود:

- پایین افتادگی تراز رودخانه

- مهاجرت جانبی رودخانه (جابجایی رودخانه در پلان)

- آبشستگی در قوس رودخانه‌ها و پیچانرودها

- آبشستگی در محل اتصال رودخانه‌ها و انشعابات

پدیده‌های فوق به‌طور مستقیم به مشخصات حوضه آبریز و شکل رودخانه وابسته‌اند (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۰).

## ۲-۲-۳-۲- آبشستگی موضعی

این نوع آبشستگی ناشی از اثر موضعی سازه بر روی الگوی جریان می‌باشد که به‌صورت موضعی در پایین دست و یا اطراف سازه مورد نظر رخ می‌دهد. این نوع آبشستگی ممکن است به تنهایی و یا به همراه آبشستگی‌های دیگر باشد.

آبشستگی موضعی بر اثر ایجاد موانعی مانند پایه‌های پل‌ها، تکیه‌گاه‌های کناری و آبشکن‌ها در مسیر جریان و در اطراف این موانع رخ می‌دهد. این موانع می‌توانند سرعت موضعی جریان و آشفستگی آن را افزایش دهند و بسته به شکل سازه می‌توانند گردابه‌هایی ایجاد نمایند که نیروهای فرسایشی اضافی را بر بستر اطراف سازه اعمال نمایند. در نتیجه، نرخ حرکت رسوب و فرسایش به‌صورت موضعی در حوالی این سازه‌ها افزایش می‌یابد و منجر به پایین رفتن موضعی بستر نسبت به تراز عمومی بستر آبراهه می‌گردد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۰).

## ۲-۳-۳- آبستگي كل

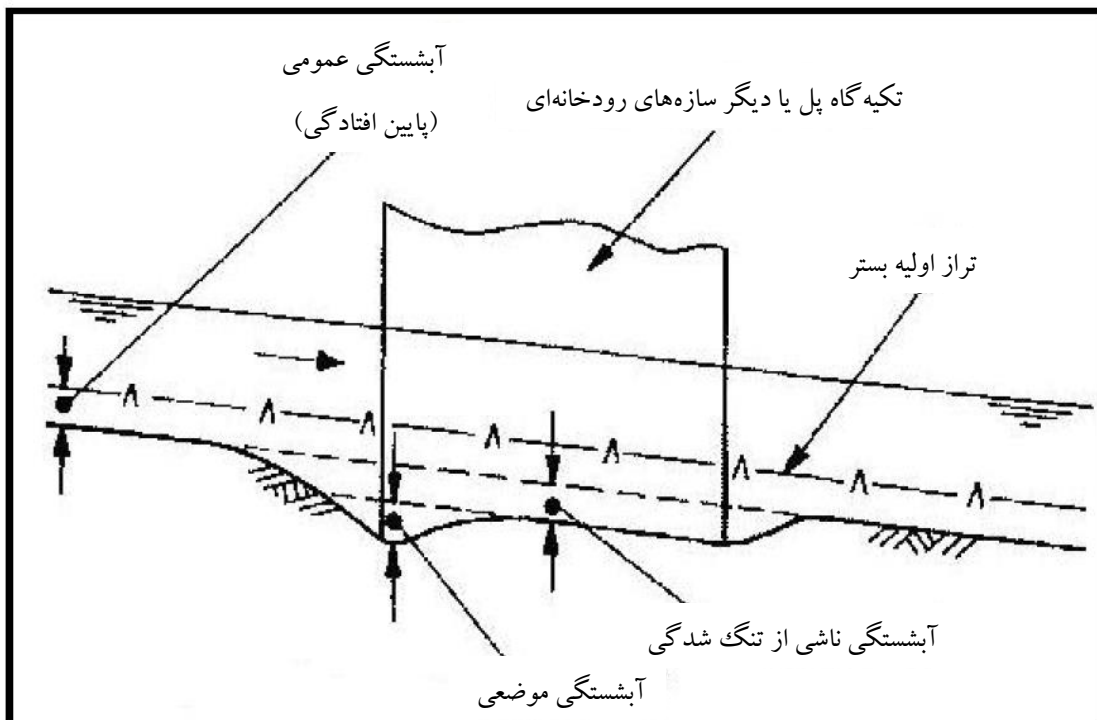
عمق آبستگي كل مرتبط با يك سازه مشخص، از مجموع سه آبستگي زير به دست مي آيد:

- آبستگي عمومي

- آبستگي ناشي از تنگ شدگي

- آبستگي موضعي

تراز موضعي بستر حاصل از هر کدام از آبستگي هاي فوق، به عنوان شرايط اوليه براي تخمين قسمت ديگر به كار مي رود. شكل (۳-۲) نمونه اي از سه قسمت آبستگي كل را نشان مي دهد (معاونت برنامه ريزي و نظارت راهبردي جمهوري اسلامي ايران، ۱۳۹۰).



شكل (۳-۲) انواع آبستگي

## ۲-۲-۴- آبشستگی در آب زلال و آب حاوی رسوب

آبشستگی در آب زلال در شرایطی اتفاق می‌افتد که مواد بستر در بالادست محدوده آبشستگی در جای خود ثابت باشند و به آستانه حرکت نرسیده باشند. به عبارت دیگر جریان ورودی از بالادست حاوی رسوب نباشد. هنگامی که سرعت جریان افزایش می‌یابد، میزان آبشستگی آب زلال تا زمان آغاز حرکت کلی مصالح بستر افزایش می‌یابد. از این زمان به بعد، تغذیه رسوبات از بالادست آغاز می‌شود. در این حالت جریان از بالادست حاوی رسوب است.

آبشستگی در آب حاوی رسوب سریع‌تر به مقدار حداکثر می‌رسد. در جریان‌های حاوی رسوب عمق آبشستگی حول یک مقدار میانگین (تعادلی) نوسان می‌نماید. آبشستگی موضعی برای رسوبات یکنواخت در شرایط آب زلال در حالت  $u / u_c < 1$  و در شرایط حمل رسوب در  $u / u_c > 1$  و مقدار حداکثر عمق آبشستگی در  $u / u_c = 1$  رخ می‌دهد. در اینجا  $u$  سرعت متوسط جریان و  $u_c$  سرعت بحرانی در آستانه حرکت است (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۰).

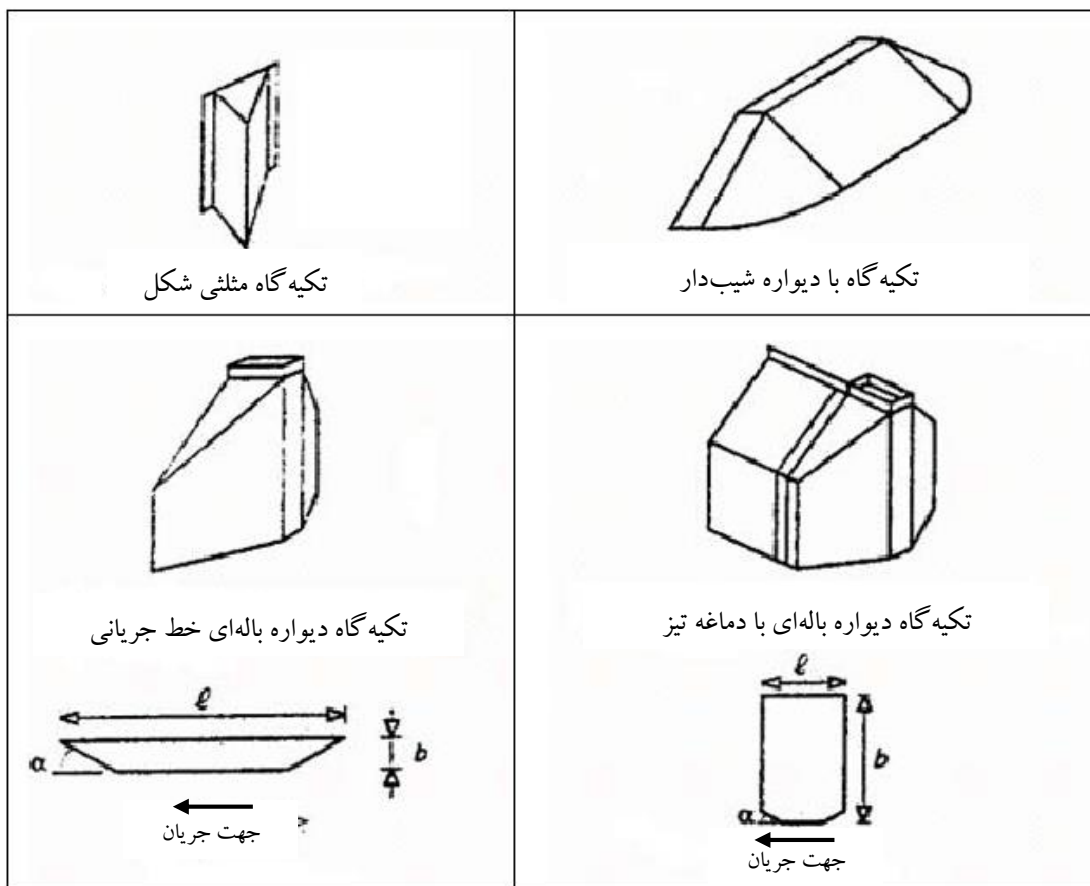
## ۲-۲-۵- آبشستگی استاتیکی و دینامیکی

اندازه‌گیری عمق حفره آبشستگی بعد از وقوع سیلاب می‌تواند گمراه‌کننده باشد. زیرا حداکثر عمق آبشستگی معمولاً در زمان حداکثر سیلاب اتفاق می‌افتد و در خلال فروکش نمودن سیلاب قسمتی از حفره آبشستگی ممکن است پر شود. کاهش عمق آبشستگی ممکن است در اثر ته‌نشینی مصالح معلق شده در حفره آبشستگی یا ریزش شیب‌های دیواره حفره آبشستگی اتفاق افتد. در تحقیقات آزمایشگاهی معمولاً دو نوع آبشستگی در نظر گرفته می‌شود که با عناوین آبشستگی استاتیکی و آبشستگی دینامیکی نامیده می‌شوند. معمولاً عمق آبشستگی استاتیکی را عمق حفره در پایان آزمایش در نظر می‌گیرند که پس از ته‌نشینی احتمالی ذرات در حفره آبشستگی به‌جای می‌ماند و عمق

آبشستگی دینامیکی، عمقی است که در هنگام انجام آزمایش و قبل از ته‌نشینی رسوبات در حفره آبشستگی وجود دارد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۰).

## ۳-۲- تکیه‌گاه پل

تکیه‌گاه‌های پل یا کوله‌های پل، پایه‌های پل چسبیده به ساحل رودخانه می‌باشند. تکیه‌گاه‌ها معمولاً بتنی هستند و معمولاً منفرد و در دو طرف رودخانه ساخته می‌شوند. در حالت کلی، تکیه‌گاه‌ها به تکیه‌گاه‌های خط جریانی و تکیه‌گاه‌های با دماغه تیز تقسیم می‌شوند. هندسه تکیه‌گاه‌ها به انواع مختلفی نظیر دیوار باله‌ای، دیوار شیب‌دار و دیوار قائم تقسیم می‌شوند. در شکل (۲-۴) انواع تکیه‌گاه‌ها به صورت شماتیک نشان داده شده‌اند (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۰).



شکل (۲-۴) انواع تکیه‌گاه

## ۲-۴- مکانیسم جریان در اطراف تکیه‌گاه پل

مسأله آبستگي در محدوده پل‌ها، سال‌هاست که ذهن پژوهشگران را به خود مشغول نموده است. هافمن و ورهيج (۱۹۹۷) به این موضوع اشاره داشتند که تحليل آبستگي جزء اصلي طراحی زیرسازی و پی‌سازی پل‌های جدید می‌باشد و این تحليل باید تضمین کننده مقاومت پل در برابر جریان‌ها و سیلاب‌های بزرگ باشد. همان گونه که اشاره گردید، الگوی جریان و فرآیند آبستگي اطراف تکیه‌گاه پل یک پدیده پیچیده است که از اثر متقابل جریان آشفته سه بعدی در میدان اطراف تکیه‌گاه ناشی می‌شود و فرسایش رسوبات بستر را به دنبال دارد. پژوهش‌ها در زمینه فرآیند آبستگي در تکیه‌گاه پل‌ها توسط وانگ (۱۹۸۲)، تی (۱۹۸۴)، کوان (۱۹۸۴ و ۱۹۸۸)، کانداسمی (۱۹۸۹)، دانگل (۱۹۹۴) و بسیاری دیگر نشان داده است که فرآیند آبستگي در تکیه‌گاه پل‌ها بسیار شبیه به فرآیند آبستگي در پایه پل‌ها است، با این تفاوت که لایه مرزی ناشی از دیواره کانال، وضعیت پیچیده‌تری را در جریان اطراف سازه نسبت به پایه‌های پل ایجاد می‌کند (ملویل، ۱۹۹۷). در شکل (۲-۵) نمونه‌ای از آبستگي تکیه‌گاه پل نشان داده شده است.



شکل (۲-۵) فرسایش جداره و بستر رودخانه در اطراف تکیه‌گاه پل در یک رودخانه



علاوه بر این، آزمایش‌های پژوهشگران مختلف، نشان داد که عمق آبشستگی در تکیه‌گاه‌ها کمتر از معادل آن در پایه‌های پل است که به دلیل اثرات لایه مرزی غالب شده ناشی از دیواره کانال است (کودیاری و رانگراجو، ۲۰۰۱). جریان پایین رونده<sup>۱</sup> و گرداب اصلی<sup>۲</sup> در گوشه بالادست تکیه‌گاه پل، همراه با گرداب ثانویه<sup>۳</sup> و گرداب برخاستگی<sup>۴</sup> در قسمت میانی و گوشه انتهایی تکیه‌گاه پل، باعث ایجاد فعل و انفعال پیچیده‌ای بین سیال و مواد بستر می‌شود که دلیل اصلی آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها است (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۲).

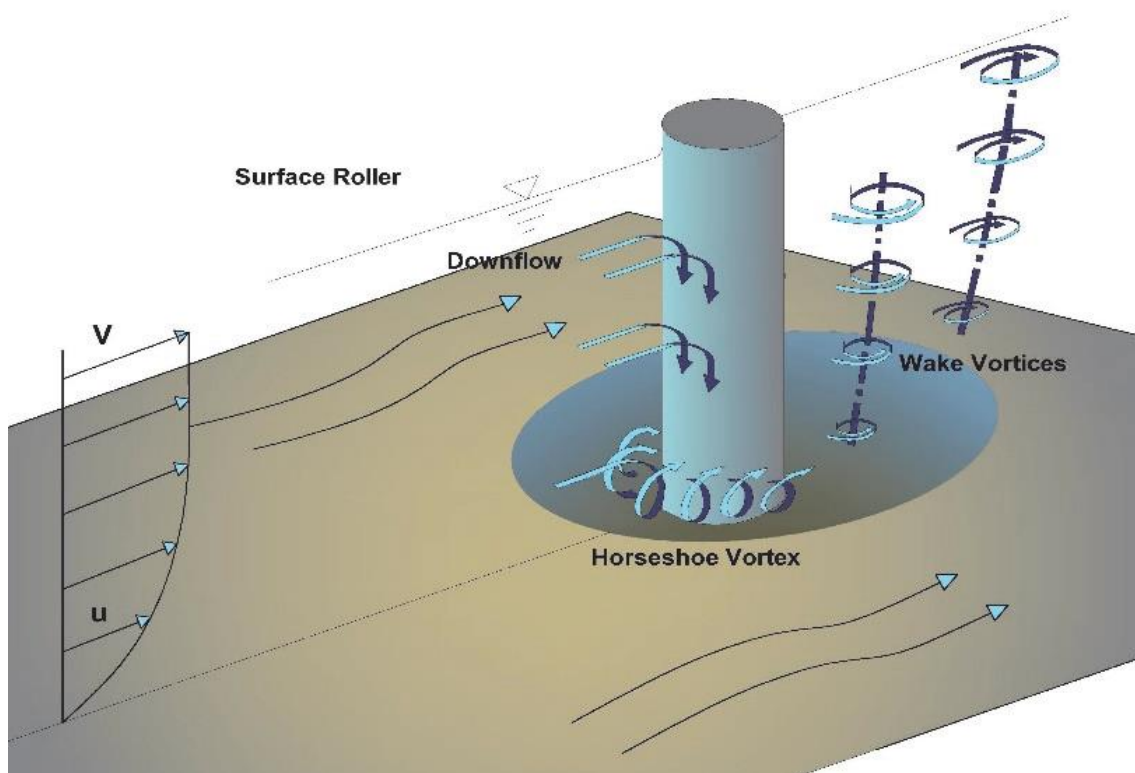
آبشستگی در رودخانه‌ها یا به صورت تغییرات طبیعی جریان در بستر رودخانه اتفاق می‌افتد و یا نتیجه اقدامات عمرانی از قبیل ساخت و ساز بناهای آبی در مسیر رودخانه یا لایروبی مواد از بستر رودخانه است. حضور سازه‌ها و ابنیه‌ی آبی در رودخانه و کانال‌ها ضمن اینکه هزینه‌های هنگفتی در پی دارند، مسبب به وجود آمدن آبشستگی در بستر فرسایش‌پذیر رودخانه نیز می‌باشند. (بروسرز و همکاران، ۱۹۹۷؛ کان و ملویل، ۱۹۹۴؛ گراف، ۱۹۹۶؛ کاردوسو و بتس، ۱۹۹۹) آبشستگی بیش از اندازه در اطراف تکیه‌گاه پل، منجر به تخریب سازه و درنهایت فروریختن پل می‌شود. قبل از بررسی روش‌های کاهش آبشستگی، آگاهی در مورد مکانیسم آبشستگی، پارامترهای مؤثر در آن، همچنین تخمین عمق آبشستگی در تکیه‌گاه پل‌ها ضروری است (خزیمه نژاد، ۱۳۹۱).

- 
- 1- Down Flow
  - 2- Primary Vortex
  - 3- Secondary Vortex
  - 4- Wake Vortex

## ۲-۵- الگوی جریان

### ۲-۵-۱- الگوی جریان در اطراف پایه پل

پل که در مسیر آب رودخانه‌ها ساخته می‌شوند باعث ایجاد برخی از تغییرات در الگوهای جریان می‌باشد. این تغییرات عمدتاً نتیجه تغییرات در شکل رودخانه است. کاهش عرض رودخانه در محل احداث پل به‌طور قابل‌توجهی الگوهای جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هنگامی که خطوط جریان نزدیک به اسکله را تغییر دهید خود باعث ظهور الگوهای جریان‌های مختلف در سراسر طول پل خواهد شد. الگوهای جریان جدید تحت تأثیر هندسه و از سوی دیگر ویژگی‌های فنی اسکله ایجاد شده. یکی از مهم‌ترین عواقب قابل‌توجه از این رویداد آبستگي تولید شده در اطراف پایه‌ی پل است که ایمنی ساختار پل را تهدید می‌کند. به‌منظور تعیین خصوصیات حفره آبستگي، پیدا کردن حداکثر عمق آبستگي یک عامل مهم است (Shatirah Akib et al, 2014). شکل (۲-۶) بلند کردن رسوب از بستر یک گودال آبستگي در پایه پل را نشان می‌دهد.

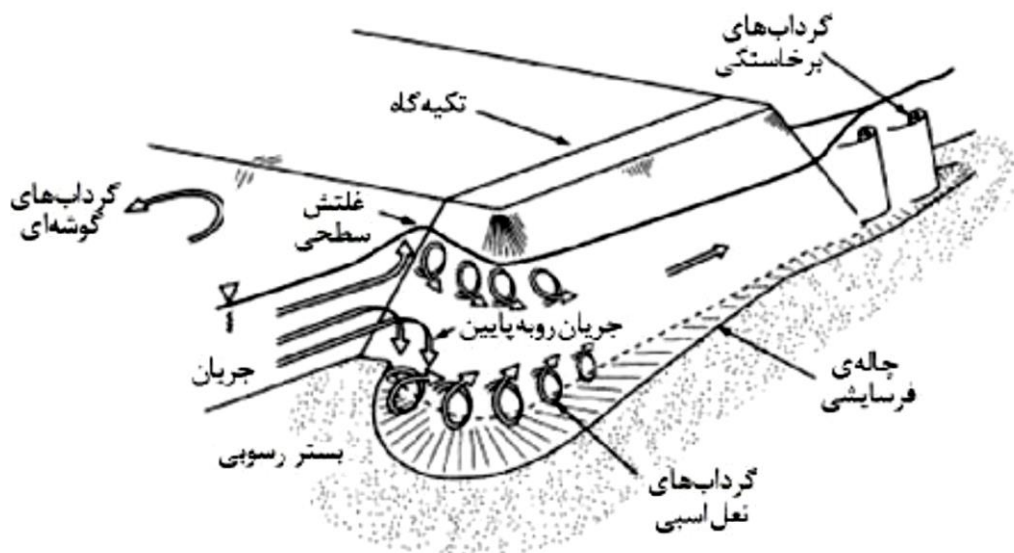


شکل (۲-۶) الگوی جریان اطراف پایه پل

## ۲-۵-۲- الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه پل

تکیه‌گاه بخشی از مقطع رودخانه را محدود می‌کند و بر روی ساختار حرکتی جریان در مجاورت آن تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. سرعت متوسط و دبی در واحد عرض در محل سازه افزایش می‌یابد که باعث آشفته‌گی بیشتر جریان در اطراف سازه می‌شود. الگوی جریان در اطراف سازه و شکل‌گیری گردابه‌ها بر روی مصالح بستر دلایل اصلی آبه‌ستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه می‌باشند. در نتیجه برگشت آب یک جریان چرخشی نیمه نعل اسبی نسبتاً بزرگ با محور افقی در اطراف تکیه‌گاه ایجاد می‌شود. فوران‌های انتهایی گردابه از دماغه تکیه‌گاه با چرخش آب به طرف جریان اصلی حرکت می‌کند. تغییر جهت جریان و ایجاد نیروهای مرکزی ممکن است چرخش به سمت راست را ایجاد کند. به عبارت دیگر فوران‌های انتهایی به طرف دماغه تکیه‌گاه جریان می‌یابند. این جریان‌های چرخشی متضاد، یکدیگر را خنثی می‌کنند که در نتیجه آن از شدت فرسایش کاسته می‌شود. در پایین دست جریان‌های چرخشی با محور قائم که بنام گرداب‌های فون کارمن معروف هستند ایجاد می‌شوند. این سامانه چرخشی به وسیله چرخش لایه‌های برشی بین جریان اصلی و یک گرداب با محور قائم ایجاد می‌شوند. گرداب‌های فون کارمن با مکیدن رسوبات به درون حفره‌های کم‌فشار، مشابه گردباد عمل می‌کنند. ساختار حرکتی جریان در اطراف تکیه‌گاه‌ها به میزان زیادی تحت تأثیر طول نسبی آنها، شکل (خصوصاً شیب دماغه و پهلوها) و محل قرارگیری آنها (به صورت ردیف تکیه‌گاه‌هایی که در روی سواحل محدب، مقعر و یا مستقیم رودخانه قرار می‌گیرند) می‌باشد. هنگامی که جریان به یک تکیه‌گاه در مسیر مستقیم می‌رسد، الگوی جریان به دلیل کاهش عرض مقطع تغییر می‌کند و در نتیجه آن توزیع تنش برشی در اطراف تکیه‌گاه دستخوش تغییر می‌شود. میدان جریان در اطراف یک تکیه‌گاه در مسیر مستقیم به دو ناحیه تقسیم می‌شود. در ناحیه اول از بالادست تا مقطعی که بیشترین تنگ‌شدگی را دارد، جریان دارای یک شتاب تند شونده می‌باشد و در ناحیه دوم از مقطعی که بیشترین تنگ‌شدگی را دارد تا پایین دست، جریان با یک شتاب کند شونده دنبال می‌شود و یک نقطه‌ی جدایی جریان در رأس تکیه‌گاه قرار دارد. در پایین دست تکیه‌گاه نیز جریان اصلی از یک

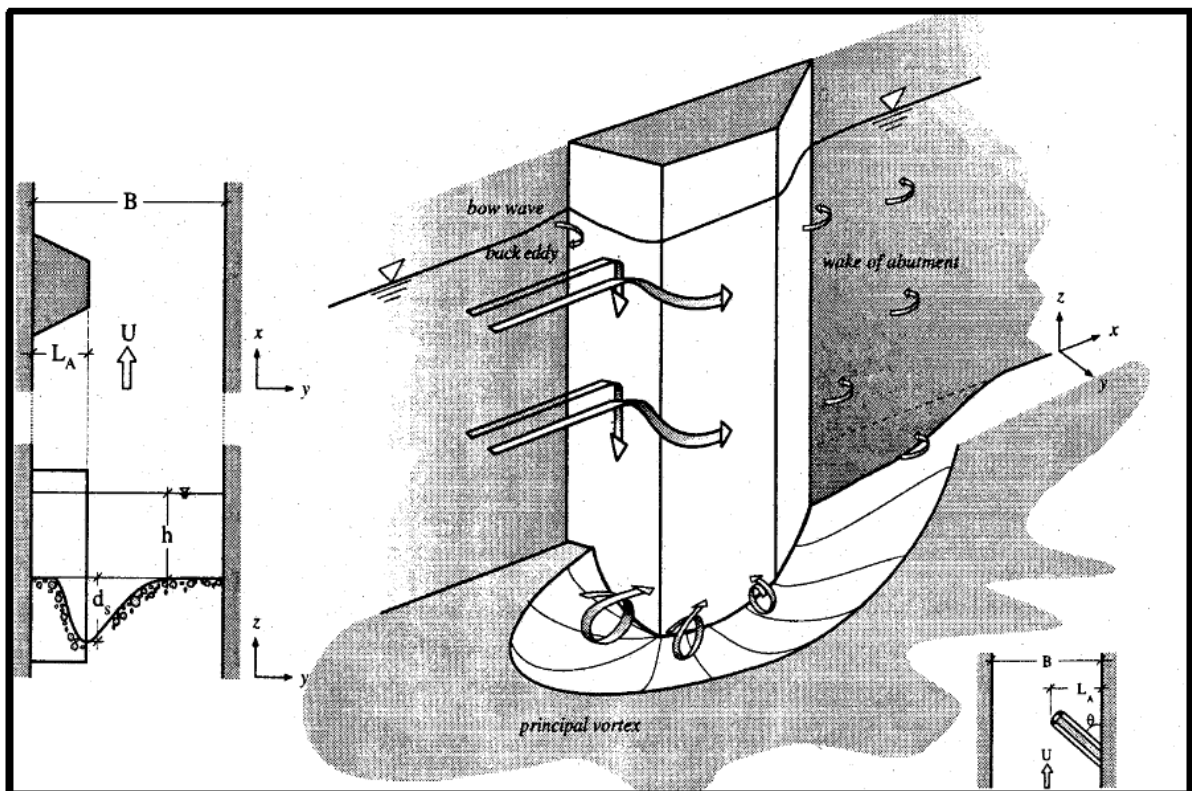
گردابه‌ی بزرگ جدا و در پایین دست نقطه‌ی اتصال مجدد، جریان نرمال مجدداً برقرار می‌شود. البته در بالادست تکیه‌گاه نیز یک نقطه‌ی جدایی و گردابه‌های کوچک می‌تواند وجود داشته باشد. بنابراین در وجه بالادست تکیه‌گاه نیز یک نقطه‌ی اتصال مجدد وجود دارد. همچنین در نزدیکی دیواره‌های قائم تکیه‌گاه یک حرکت مارپیچی شدید ناشی از جریان‌های برگشتی در نزدیکی بستر تولید می‌گردد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۰). شکل (۷-۲) گردابه‌های شکل گرفته در تکیه‌گاه را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۲) الگوی جریان در اطراف تکیه‌گاه

الگوی جریان و مکانیسم آبشستگی بسیار پیچیده است و فاکتورهای زیادی باعث افزایش توسعه گودال آبشستگی می‌شوند. مکانیسم اصلی ایجاد آبشستگی موضعی در جریان پایین تکیه‌گاه است. در صورتی که در بالادست گردابه‌های نعل اسبی تشکیل می‌شود. اعتقاد بر این است که علت اصلی آبشستگی در تکیه‌گاه گردابه نعل اسبی است که توسعه آن با توجه به جدایی جریان در لبه صیقلی

حفره رول بالادست به صورت جریان ماریپیچ به وجود می آید. گرداب یک نتیجه از آبشستگی است، نه علت اصلی آن. جدایی از جریان در دو طرف تکیه گاه همچنین باعث ایجاد گردابه می شود. چنین جریانی بی ثبات هستند و نظم جریان در هر طرف از اسکله را به هم می ریزند. آنها به عنوان گردباد کوچک عمل می کنند. (et al, 2014 Shatirah Akib). شکل (۸-۲) مسیر جریان در اطراف تکیه گاه را نشان می دهد.



شکل (۸-۲) جریان در اطراف تکیه گاه

## ۲-۶- بررسی پارامترهای مؤثر بر آبشستگی تکیه‌گاه پل

برای بدست آوردن انواع و میزان آبشستگی باید پارامترهای زیادی را مورد بررسی قرار داد. پارامترهای مؤثر بر آبشستگی موضعی در تکیه‌گاه پل‌ها در جدول (۱-۲) آمده است. دانش اینکه چگونه این متغیرها می‌توانند آبشستگی تکیه‌گاه را تحت تأثیر قرار دهند در طراحی روش‌های جلوگیری کننده از آبشستگی لازم می‌باشند (خزیمه نژاد، ۱۳۹۱).

جدول (۱-۲) پارامترهای مؤثر بر آبشستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه پل

پارامتر	نماد	دسته	پارامتر	نماد	دسته
طول تکیه‌گاه	$L_a$		قطر متوسط ذرات	$d_s$	
زاویه‌ی برخورد جریان	$\alpha$	تکیه‌گاه	چگالی ویژه ذرات	$S_s$	
شکل تکیه‌گاه	$K_s$		انحراف معیار استاندارد	$\sigma_g$	
عمق نرمال جریان	$y$		سرعت سقوط	$W$	
سرعت متوسط نزدیک‌شونده	$V$	جریان	فاکتور شکل ذرات	$S_p$	ذرات بستر
شتاب ثقل زمین	$g$		زاویه‌ی ایستایی	$\varphi$	
شیب خط انرژی	$S_e$		چسبندگی	$C$	
عرض کانال	$B$		تنش برشی بحرانی بی‌بعد	$\theta_c$	
شیب کانال	$S_0$	کانال	رینولدز برشی ذرات	$Re_*$	
هندسه‌ی کانال	$K_g$		زمان	$t$	زمان
جرم مخصوص	$\rho$				
لزوجت دینامیکی	$\mu$	سیال			
درجه‌ی حرارت	$T$				

## ۷-۲- پارامترهای مؤثر در میزان آبشستگی

بر اساس تحقیقات صورت گرفته عوامل مؤثر بر میزان آبشستگی را می‌توان در پارامترهای زیر خلاصه کرد.

۱- سرعت جریان

۲- عمق جریان

۳- طول تکیه‌گاه و شیب بسته شدن و باز شدن تکیه‌گاه

۴- اندازه و چگالی و خصوصیات رسوب

۵- شکل تکیه‌گاه

۶- زاویه تکیه‌گاه

۷- هندسه کانال

۸- مدت زمان آبشستگی (Dey S and Barbhuiya A 2004).

همچنین دیگر پژوهشگران پارامترهای مؤثر در آبشستگی را شامل شدت جریان، عمق جریان، عدد اولر و عدد رینولدز، اندازه رسوب، غیر یکنواختی رسوب، مدت زمان آبشستگی، شکل پایه پل، میزان رسوب شناور، تراز پایه پل و روسازی سطح پل می‌دانند (Bruce Melville 2008).

## ۸-۲- شکل تکیه‌گاه

بررسی منابع نشان می‌دهد که در تعیین الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه پل، شکل مقطع پل در نظر گرفته نشده است و به صورت عمومی در خصوص میدان جریان پیرامون تکیه‌گاه پل صحبت شده است. البته در خصوص الگوی آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه با اشکال مختلف بررسی‌هایی انجام شده است و این نکته به صراحت بیان گردیده که میزان آبشستگی موضعی در تکیه‌گاه‌ها بسته به شکل آنها با هم متفاوت می‌باشد. مطالعات اینگلس (۱۹۴۹) در مورد تکیه‌گاه‌ها نشان داد که عمق آبشستگی در

تکیه‌گاه‌ها به نسبت شکل انحنا و خمیدگی آنها متغیر است. لیو و همکاران (۱۹۶۱) پی بردند که آبشستگی در تکیه‌گاه‌های بال‌دار، دو برابر آبشستگی در تکیه‌گاه‌های میان ریزی است. پژوهش‌های لارسن و تاچ (۱۹۵۶) نشان از تأثیر شکل تکیه‌گاه بر عمق آبشستگی و کاهش ۱۵ درصد برای تکیه‌گاه‌های آیرودینامیک داشت. راجاراتنام و نواچوکوا (۱۹۸۳)، مشاهده کردند که تنش برشی در دیواره ساحلی صفحه‌ای به مقدار ۱۴ درصد بیش‌تر از دیواره ساحلی دایره‌ای است (لی و همکاران، ۲۰۰۶). آزمایش‌های دانگل (۱۹۹۴) نشان داد که حداکثر عمق آبشستگی در تکیه‌گاه‌های با دیواره عمودی و کم‌ترین عمق آبشستگی در تکیه‌گاه‌های میان ریزی با شیب ملایم اتفاق می‌افتد. فیلد (۱۹۷۱) و ملویل (۱۹۹۲) و دیگر پژوهشگران ضرایب و روابط مختلفی برای شکل تکیه‌گاه، برای طراحی بهتر پیشنهاد کردند. ملویل (۱۹۹۲، ۱۹۹۷) فاکتور شکل (Ks) را برای بیان تأثیر شکل تکیه‌گاه روی عمق تعادل آبشستگی استفاده کرد که تأثیر زیادی در میزان آبشستگی داشته است. ملویل (۱۹۹۲) تأثیر طول تکیه‌گاه را بر عمق آبشستگی مورد بررسی قرار داد و نشان داد که با افزایش طول تکیه‌گاه، عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. کایاترک (۲۰۰۵) تأثیر عدد فرود را بر میزان آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل‌ها مورد بررسی قرار داد، آزمایش‌های وی در سه عدد فرود ۰/۲۰، ۰/۲۶، ۰/۳۴ انجام گردید. نتایج نشان داد که با افزایش عدد فرود عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. واقفی و همکاران (۲۰۱۰) در یک مطالعه آزمایشگاهی اثر عدد فرود جریان را بر الگوی آبشستگی پیرامون آبشکن مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش عدد فرود جریان، بر میزان آبشستگی و ابعاد حفره آبشستگی افزوده می‌شود (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۲).

## ۲-۹- عمق آبشستگی

در طی مطالعاتی که از سال ۱۹۶۱ بر روی آبشستگی تکیه‌گاه پل صورت گرفته است روابط زیادی برای محاسبه عمق آبشستگی ارائه گردیده است. هرچند شرایط حاکم بر معادلات هریک از محققین



متفاوت بوده، اما تلاش شده تا با در نظر گرفتن آبشستگی تکیه‌گاه پل در آب زلال شرایط یکنواخت فرض شود و معادلات با یکدیگر مقایسه شوند. این معادلات و روابط در جدول (۲-۲) نشان داده شده است (Pezhman Taherei Ghazvinei et al, 2014).

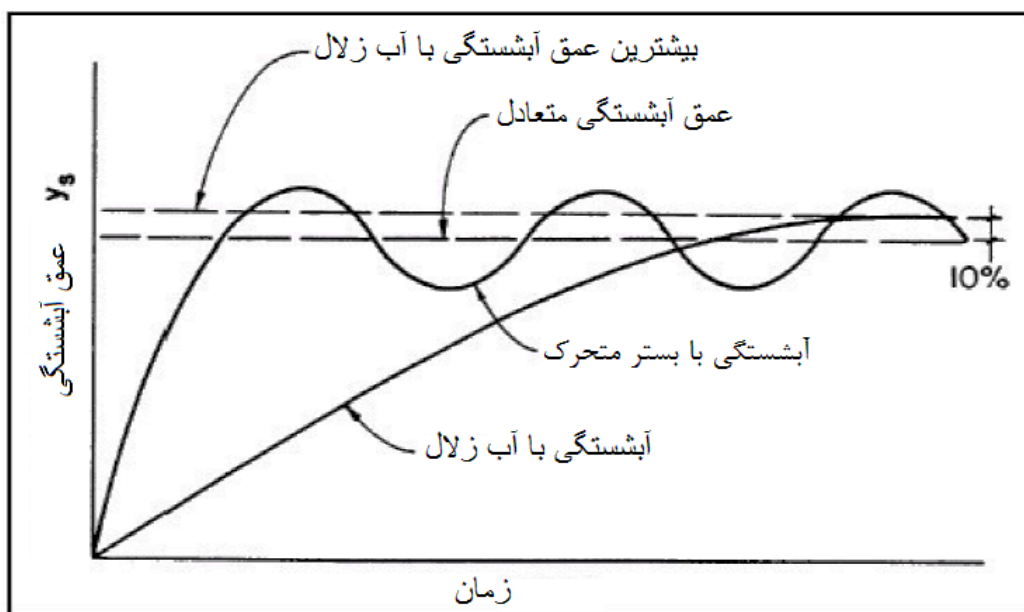
جدول (۲-۲) معادلات ارائه شده برای آبشستگی موضعی تکیه‌گاه پل تحت شرایط آب زلال

Reference	Equation		Applicability
Liu <i>et al.</i> (1961)	$\frac{d_s}{y} = 12.5 Fr \beta$	(6)	Clear-water condition
Laursen (1963)	$\frac{L}{y} = 2.75 \frac{d_s}{y} \left[ \frac{\left(\frac{d_s}{11.5y} + 1\right)^{7/6}}{\left(\frac{L}{\tau_c}\right)^{0.5}} - 1 \right]$	(7)	Clear-water scour at an abutment encroaching in to the main channel
	$\frac{d_s}{L} = 1.89 \left(\frac{y}{L}\right)^{0.5}$	(8)	At the threshold condition
Melville (1992)	$\frac{d_s}{L} = K_I K_Y K_d K_\sigma K_s K_\theta K_G$	(9)	Clear-water condition
	$\frac{d_s}{y} = K_I K_L K_d K_\sigma K_s K_\theta K_G$	(10)	
	$d_s = 2K_s^* K_\theta^* \sqrt{Ly}$	(11)	$K_{yL} = 2(yL)^{0.5}$ for $1 \leq L/y \leq 25$
	$d_s = 2K_s L$	(12)	$K_{yL} = 2L$ for $L/y < 1$
	$d_s = 10 K_\theta y$	(13)	$K_{yL} = 10y$ for $L/y > 25$
Melville (1997)	$d_s = K_{yL} K_L K_d K_s K_\theta K_G$	(14)	Clear-water condition
Kouchakzadeh (1996)	$\frac{d_s}{y_a} = 13.5 \left(\frac{Q_w}{Q_a}\right)^{3.9} F_a^{1.17} F_c^{-0.25}$	(15)	Clear-water condition, uniform sediment in compound channel $F_c = \frac{U_c}{\sqrt{g y_a}}$
Oliveto <i>et al.</i> (2002)	$\bar{d}_s = 0.068 N \sigma_g^{-1/2} F_d^{1.5} \log T$	(16)	Clear-water condition $N = 1.25$ for vertical abutment $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{1/2}$ $T = t/t_R$ $t_R = d_{sR}/(\sigma_g^{1/3} (g' d_{50})^{1/2})$ $g' = [(\rho_s - \rho)/\rho]$
Dey and Barbhuiya (2005)	$\hat{d}_s = 8.689 F_d^{0.192} \hat{y}^{0.103} \hat{l}^{-0.296}$	(17)	Clear-water condition for semicircular abutment
	$\hat{d}_s = 7.281 F_d^{0.314} \hat{y}^{0.128} \hat{l}^{-0.167}$	(18)	Clear-water condition for vertical-wall abutment
	$\hat{d}_s = 8.319 F_d^{0.312} \hat{y}^{0.101} \hat{l}^{-0.231}$	(19)	Clear-water condition for 45° wing-wall abutment
Yanmaz and Kose (2007b)	$d_s/L = 0.25 F_d^{0.85} (L/y)^{0.15} (\log T_s)^{0.60}$	(20)	Clear-water condition, uniform sediment $T_s = t d_{50} (\Delta g d_{50})^{0.5} / L^2$ $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$

## ۲-۱۰- تأثیر زمان بر آبشستگی

تعدادی از دانشمندان آزمایش‌هایی برای بررسی زمان تکامل در توسعه عمق آبشستگی انجام داده‌اند. در آب زلال عمق آبشستگی توسعه پیدا می‌کند و به سمت عمق تعادل تمایل پیدا می‌کند. از سوی دیگر برای بستر متحرک آبشستگی می‌تواند به سرعت به عمق تعادل برسد. بنابراین نوسان‌های عمق

آبشستگی به خصوصیات بستر پایه پل بستگی دارد. در آزمایش‌هایی با شرایط آب زلال برای رسیدن به شرایط تعادل باید زمان رسیدن به عمق تعادل آبشستگی اندازه‌گیری شود. این زمان می‌تواند بیشتر از یک هفته باشد یا به صورت نامحدود برای عمق آبشستگی بیان شود. در یک تحقیق که توسط اداره تحقیقات حمل و نقل فدرال ایالات متحده در سال ۲۰۰۱ انجام شده این‌گونه منتشر شده است که آبشستگی در آب زلال در مقایسه با آبشستگی با بستر متحرک زمان بیشتری طول می‌کشد. آبشستگی در آب زلال نیازمند شرایط متعددی برای رسیدن به جریان مورد نظر است. حداکثر آبشستگی منطقه‌ای در آب زلال حدوداً ۱۰ درصد بیشتر از آبشستگی به تعادل رسیده در بستر متحرک است. اکثر فرمول‌های آبشستگی نتایج مناسب و محافظه کارانه‌ای برای عمق تعادل در بستر متحرک را داده‌اند. در آبشستگی با آب زلال عمق آبشستگی متعادل، محافظه کارانه است. به دلیل محدود شدن حرکت رسوبات توسط پوشش گیاهی، جریان‌های اطراف پایه پل بیشتر تحت تأثیر آبشستگی با آب زلال هستند. به همین دلیل است که آبشستگی در آب زلال برای تعیین عمق تعادل آبشستگی در پایه پل اهمیت دارد. در شکل (۲-۹) روند آبشستگی نشان داده شده است Shatirah (Akib and Sadia Rahman 2013).



شکل (۲-۹) روند آبشستگی با توجه به عوامل آبشستگی

## ۲-۱۱- مدل عددی

### ۲-۱۱-۱- روش مدل سازی عددی با استفاده از فلوئنت

مدل های عددی برخلاف تست های آزمایشگاهی که از اثرات مقیاس پایین رنج می برند، این محدودیت را ندارند. هنگامی که مدل عددی توسعه پیدا می کند، می توان آن را به اشکال مختلف با توجه به شرایط محیطی تغییر داد. به طور گسترده ای پذیرفته شده است که یک مدل عددی خوب می تواند مکمل مدل آزمایشگاهی شود و می تواند در شناسایی موارد مهم که در آزمون مدل آزمایشگاهی ممکن است انجام پذیر نباشد به مهندسان کمک کند. هدف نهایی از مدل های عددی کاهش هزینه آزمون مدل فیزیکی خواهد بود. فلوئنت یک نرم افزار کامپیوتری چند منظوره برای مدل سازی جریان سیال، انتقال حرارت و واکنش شیمیایی است. این نرم افزار قادر به تجزیه و تحلیل سریع جریان های پیچیده است. عملکرد فلوئنت مانند روش شبیه سازی کامپیوتری برای تجزیه و تحلیل و حل عملی مشکلات طراحی بر اساس اصول اساسی دینامیک محاسباتی سیالات (CFD) مانند بقای جرم، تکانه و انرژی است. فلوئنت قادر به حل معادلات جریان در مقیاس واقعی آن است و استفاده از آن در کنار روش مرسوم مدل سازی فیزیکی در حصول اطمینان شباهت هر دو عدد فرود و رینولدز کمک زیادی می کند (Qiping Yang, 2005).

فلوئنت نرم افزار تحلیل دو و سه بعدی جریان است که با استفاده از معادلات پیوستگی و ناویراستوکس قادر به مدل کردن جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه های پیچیده است. این نرم افزار به زبان برنامه نویسی C نوشته شده و از روش حجم محدود استفاده می کند. همچنین از میان مدل های آشفتگی مختلف موجود در نرم افزار، مدل  $k-\epsilon$  انتخاب گردید. قابلیت اجرای هم زمان در نرم افزار فلوئنت این امکان را فراهم می کند که بتوان محاسبات میدان جریان را بجای یک رایانه تک هسته ای، روی رایانه ای با تعداد هسته بیشتر و یا روی چند رایانه مختلف در یک شبکه اجرا نمود. به این ترتیب هندسه و داده ها به چند بخش تقسیم شده و هر بخش توسط یک پردازشگر هم زمان با سایر بخش ها

اجرا می‌شود. هندسه میدان با توجه به هندسه کانال آزمایشگاهی در نرم‌افزار گمبیت تهیه می‌شود (بنی سلطان و همکاران، ۱۳۸۹).

## ۲-۱۱-۲- انتخاب مش بندی مناسب

از آنجایی که نوع و تراکم مش بندی روی دقت نتایج، هزینه و زمان محاسباتی تأثیر زیادی دارد، لازم است که مش بندی مناسبی انتخاب گردد که هم جوابگوی دقت مورد نیاز در محاسبات باشد و هم از نظر زمان انجام محاسبات در حد متعارفی باشد. انتخاب یک شبکه بسیار ریز علاوه بر آنکه هزینه و زمان انجام محاسبات را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد، ممکن است روی همگرایی نتایج تأثیر منفی بگذارد. در این راستا یک بررسی روی انواع مش بندی ممکن و همچنین الگوهای مختلف مش بندی انجام گرفته و مشخص شده که مش بندی مربعی با الگوی submap و اندازه  $0.2 \times d$  و با ۸۵۰۲۰۰ عدد مش بهترین گزینه است (زارع دهدشت و همکاران، ۱۳۸۹).

دکتر ساغروانی و همکاران (۱۳۸۹) برای شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و آبشستگی موضعی در اطراف گروه پایه، شبکه‌ای سه بعدی با ابعاد هندسی منطبق بر مدل آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار تولید شبکه Gambit ایجاد نموده است. به دلیل پیچیدگی جریان در اطراف پایه‌ها شبکه متراکم‌تری در این قسمت ایجاد نموده است. ورودی جریان از نوع مرز ورودی سرعت (Velocity-inlet) و خروجی جریان نیز از نوع خروجی (outflow) انتخاب شده است. سطح آب به‌عنوان مرز تقارن (symmetry) انتخاب شد که در آن سرعت قائم صفر و گرادیان‌های قائم صفر برای تمامی متغیرها برقرار است. برای سطوح پایه‌های استوانه‌ای و کف فلوم (زیر بستر ماسه‌ای) از شرط مرزی دیواره استفاده شده است. شبکه سه بعدی ایجاد شده در نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت فراخوانی و مدل دوفازی (آب-ماسه) اولرین به‌منظور شبیه‌سازی آبشستگی موضعی اطراف پایه‌ها مورد استفاده قرار گرفت (ساغروانی و همکاران، ۱۳۸۹).

## ۲-۱۱-۳- انتخاب مدل آشفتگی

مدل‌های آشفتگی متعددی در نرم‌افزار فلونت موجود است. هر مدل بسته به نوع و شرایط ناحیه جریان مدل‌سازی شده و دقت مورد نظر، دارای مزایای خاص خود می‌باشد و امکان معرفی مدلی که بتواند برای انواع مسائل مناسب عمل نماید وجود ندارد. برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب با توجه به تحقیقات صورت گرفته پیشین، مدل‌های  $K-\epsilon$  استاندارد،  $RNG K-\epsilon$ ،  $Realizable K-\epsilon$  و RSM که تاکنون نتایج قابل قبولی را در شبیه‌سازی جریان اطراف پایه‌های پل نشان داده‌اند مورد بررسی قرار گرفتند. که از میان این مدل‌های آشفتگی مورد بررسی، مدل‌های  $RNG K-\epsilon$  و RSM نتایج قابل قبول‌تری را در شبیه‌سازی جریان اطراف پایه‌های پل نشان دادند. از میان این دو مدل آشفتگی، مدل  $RNG K-\epsilon$  به دلیل سرعت بالاتر در رسیدن به همگرایی، اقتصادی‌تر می‌باشد (محبوب و همکاران، ۱۳۹۲).

برای رژیم جریان ورقه‌ای در نرم‌افزار Fluent از مدل Laminar استفاده می‌شود. ولی برای جریان آشفته، عدد رینولدز بالاتر از ۳۰۰، بایستی یکی از مدل‌های اغتشاش انتخاب شود. لذا برای کالیبره کردن مدل و انتخاب بهترین مدل اغتشاش، مدل‌های استاندارد  $k-\epsilon$ ،  $RNGk-\epsilon$ ،  $Realizable k-\epsilon$ ، استاندارد  $k-\omega$  و مدل Reynolds stress استفاده شده است و برای هر کدام از این مدل‌ها آنالیز جریان حول پایه در عدد رینولدز ۲۰۰۰۰۰ انجام و سپس بهترین مدل که نزدیک‌ترین جواب‌ها را به نتایج بدست آمده توسط سایر محققین داشت، انتخاب گردیده است. نتایج بدست آمده از این آنالیزها در جدول (۲-۳) به‌طور کامل ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل‌های  $RNGk-\epsilon$  و Reynolds stress نسبت به سایر مدل‌ها نتایج نزدیک‌تری به مقادیر آزمایشگاهی بدست می‌دهند و از بین این دو مدل نیز  $RNGk-\epsilon$  دقت بسیار بیشتری در محاسبات ضرایب درگ و لیفت و همچنین عدد استروهل داشته و زودتر از مدل Reynolds stress به همگرایی می‌رسد. بنابراین برای انجام کلیه آنالیزهای بعدی، از مدل  $RNG k-\epsilon$  استفاده خواهد شد (زارع دهدشت و همکاران، ۱۳۸۹).

عدد استروهاال		ضریب لیفت		ضریب درگ		مدل اغتشاش
آزمایشگاهی	محاسباتی	آزمایشگاهی	محاسباتی	آزمایشگاهی	محاسباتی	
۰/۱۷~۰/۲۴	۰/۲	۰/۲۳	۰/۰۱۵	۰/۵۵~۱/۱۲	۱/۳۱۲	Standard k-ε
	۰/۲۱۷		۰/۲۷۵		۱/۲۸۹	RNG k-ε
	۰/۲۰۸		۰/۰۸۳		۱/۲۴۴	Realizable k-ε
	۰/۱۹۲		۰/۰۶۳		۱/۴۹۵	Standard k-ε
	۰/۲۲۷		۰/۰۳۸		۱/۳۳۵	Reynolds Stress
۲۰۰۰۰	مدل‌های اغتشاش مختلف در عدد رینولدز		نتایج حاصل از آنالیز جریان برای		جدول (۲-۳)	

## فصل سوم:

### مواد و روش‌ها

### ۳-۱- مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق به منظور مدل سازی عددی آبشستگی در اطراف تکیه گاه پل با استفاده از مدل عددی فلوئنت از داده های مدل آزمایشگاهی خزیمه نژاد (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲) استفاده شده است. و میزان دقت عددی در مدل سازی جریان با مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در این تحقیق از آزمایش های هیدرولیکی و رسوبی در شرایط آب زلال برای مدل عددی فلوئنت استفاده و مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۲- پارامترهای مؤثر در آبشستگی

پارامترهای مؤثر بر حداکثر عمق آبشستگی در محل تکیه گاه پل را می توان با استفاده از رابطه زیر بیان نمود.

$$f_1(B, L_a, B_a, \phi_1, d_s, y_s, V, g, y, \alpha, \rho, \rho_s - \rho, \mu) = 0 \quad (1-3)$$

که در آن، پارامترها به ترتیب B: عرض کانال،  $L_a$ : طول،  $B_a$ : عرض تکیه گاه،  $\phi_1$ : شکل تکیه گاه،  $d_s$ : قطر متوسط ذرات رسوب،  $y_s$ : حداکثر عمق چاله آبشستگی، V: سرعت متوسط جریان، g: شتاب ثقل، y: عمق جریان،  $\alpha$ : زاویه برخورد جریان با تکیه گاه،  $\rho$ : جرم مخصوص آب،  $\rho_s$ : جرم مخصوص رسوب و  $\mu$ : لزجت دینامیکی جریان می باشند. با استفاده از تحلیل ابعادی و استفاده از روش باکینگهام رابطه زیر قابل ارائه است.

$$y_s / y = f_2(B / L_a, B_a / L_a, \phi_1, d_s / y, Fr, \alpha, Re, Gs) = 0 \quad (2-3)$$



که در آن،  $Re$ : عدد رینولدز و  $Gs$ : چگالی ذرات رسوب می‌باشد. از میان پارامترهای بالا عدد فرود و نسبت عرض به طول تکیه‌گاه به‌عنوان متغیر، تأثیرشان در  $y/y_s$  (عمق بی بعد آبشستگی) مورد بررسی قرار گرفت (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۲).

### ۳-۳- مدل آزمایشگاهی

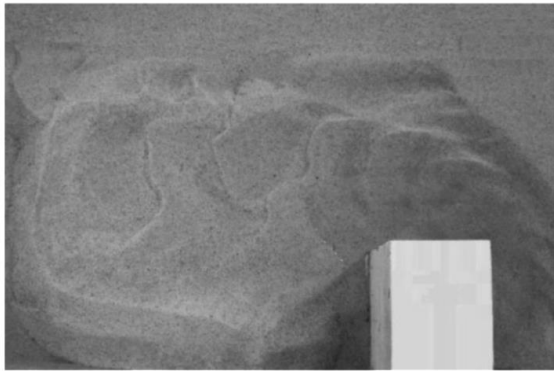
آزمایش‌های خزیمه نژاد (۱۳۹۱ و ۱۳۹۲) در فلومی به طول ۸ متر و عرض ۱ متر و ارتفاع ۰/۶ متر و شیب ثابت ۰/۰۰۰۳ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. دیواره‌های کانال از جنس پلکسی گلاس و به ضخامت یک سانتی‌متر تشکیل شده‌اند. در فاصله‌ی ۴ متری از ابتدای فلوم یک جعبه‌ی فلزی قرار گرفته که طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب حدود ۲، ۰/۷ و ۰/۳ متر می‌باشد. این باکس از یک نمونه رسوب یکنواخت دارای انحراف معیار هندسی ۱/۲، چگالی ۲/۶۵ و قطر متوسط ۰/۷۶ میلی‌متر پر شده است به نحوی که پس از پر شدن در تراز بستر کانال قرار می‌گیرد. برای اینکه اندازه‌ی رسوب تأثیری بر آبشستگی ایجاد نکند و از تشکیل فرم بستر نیز جلوگیری شود، بایستی نسبت قطر پایه به اندازه‌ی رسوب بیشتر از ۲۰ الی ۲۵ باشد. هرچند برای تکیه‌گاه شرایط تقریباً متفاوت است اما اندازه‌ی رسوب در نظر گرفته شده با این معیار مطابقت دارد (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۱).

آب از طریق پمپ از مخزن زیرزمینی آزمایشگاه پمپاژ شده و به قسمت ابتدایی فلوم که بخش آرام کننده می‌باشد هدایت می‌شود. در انتهای فلوم دریچه‌ی کنترل جهت تنظیم عمق در رقوم مورد نظر قرار دارد. سپس آب وارد حوضچه‌ی آرامش می‌شود. در انتهای حوضچه‌ی آرامش، سرریز مثلی ۵۳ درجه‌ی استاندارد قرار دارد که دبی جریان توسط آن اندازه‌گیری می‌شود. آب پس از عبور از سرریز، مجدداً وارد مخزن زیرزمینی آزمایشگاه می‌شود و به این ترتیب یک جریان رفت و برگشتی در کل زمان آزمایش در فلوم برقرار می‌باشد.

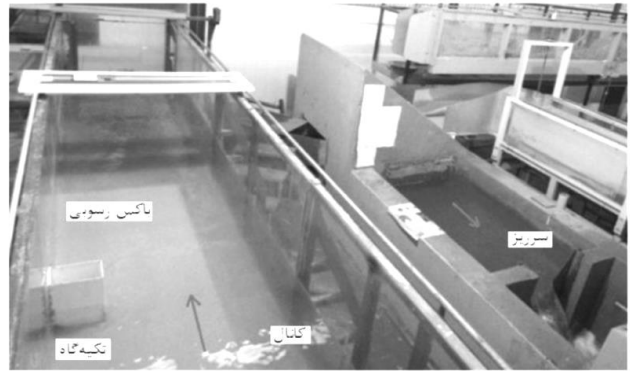
به‌طور کل آبشستگی به دو نوع آبشستگی در حالت آب زلال و آبشستگی در حالت بستر زنده تقسیم می‌شود. در حالت آب زلال  $0/3 < V/V_0 < 1$  می‌باشد که  $V$ : سرعت متوسط جریان  $V_0$ : سرعت آستانه حرکت ذرات رسوب می‌باشد و در حالت بستر زنده سرعت جریان بیشتر از سرعت آستانه حرکت رسوبات می‌باشد و از آنجایی که در این حالت رسوبات بالادست به درون حفره‌ی آبشستگی ریزش می‌کنند از میزان آبشستگی کاسته می‌شود، بنابراین حداکثر عمق آبشستگی در شرایط آستانه حرکت رسوبات یعنی  $V/V_0=1$  رخ می‌دهد (Melville B.W. 1992).

توضیح اینکه کلیه‌ی آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام شده است. آستانه حرکت در شرایط آب زلال و بستر زنده تعیین شده و بیشترین میزان آبشستگی موضعی نیز در همین شرایط رخ می‌دهد. بنابراین ابتدا سرعت آستانه حرکت ذرات رسوب، بدون حضور تکیه‌گاه تعیین شد. یکی از روش‌های تعیین سرعت آستانه حرکت، استفاده از سرعت بحرانی است. سرعت بحرانی جریان با برقراری دبی ثابت و کاهش تدریجی عمق جریان، در چند مرحله محاسبه گردید. سرعت بحرانی با توجه به روش نام‌برده معادل  $0/28$  متر بر ثانیه تعیین شد. عدد فرود جریان در شرایط آستانه حرکت ذرات رسوب برابر  $0/23$  بود، بنابراین آزمایش‌ها در چهار عدد فرود  $0/22$ ،  $0/20$ ،  $0/18$ ،  $0/15$  انجام شد. در این شرایط دبی به ترتیب برابر  $40$ ،  $36$ ،  $32$ ،  $28$  لیتر بر ثانیه و عمق جریان ثابت و برابر  $0/15$  متر بود (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۲).

با توجه به اینکه در همه‌ی آزمایش‌ها عمق جریان دارای مقدار ثابت  $0/15$  متر بود، لذا در دبی‌های مذکور به ترتیب چهار مقدار  $0/95$ ،  $0/86$ ،  $0/76$  و  $0/67$  برای پارامتر  $V/V_0$  در مقطع آزمایشی برقرار گردید. محدوده‌ی در نظر گرفته شده تقریباً بخش عمده‌ای از محدوده‌ی فرسایشی موضعی جریان اطراف تکیه‌گاه را پوشش می‌دهد. در این تحقیق از تکیه‌گاه مستطیلی از جنس آهن گالوانیزه به طول  $0/2$  و عرض  $0/12$  متر استفاده گردید. در شکل (۳-۱) نمایی از فلوم آزمایشگاهی و مقطع آزمایش نشان داده شده است (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۱).



(ب)

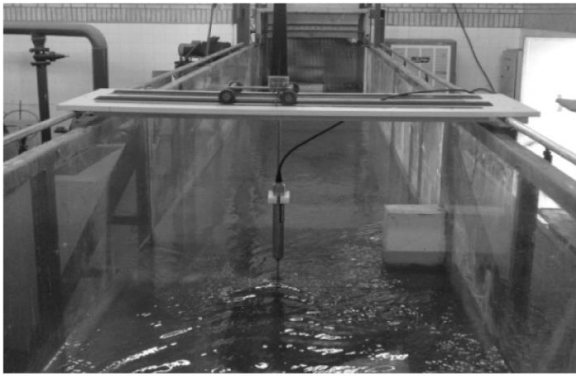


(الف)

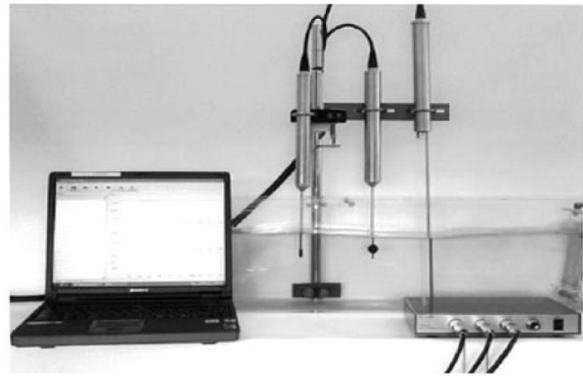
شکل (۱-۳) الف) فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش و ب) مقطع آزمایش

### ۳-۴- مراحل انجام مدل آزمایشگاهی

در شروع هر آزمایش ابتدا فلوم با نرخ کم جریان پر می‌شود، این امر به این دلیل است که جلوی فرسایش ناشی از جریان ورقه‌ای در ابتدای آزمایش گرفته شود. سپس دبی آب به آرامی زیاد شده تا به دبی مورد نظر برسد، پس از تنظیم دبی توسط سرریز مثلی به وسیله دریچه کنترل، آب در عمق مورد نظر یعنی  $0/15$  متر قرار می‌گیرد. سپس آزمایش به مدت زمان تعیین شده ادامه پیدا کرده و پس از اتمام آزمایش آب به آرامی از فلوم خارج می‌گردد. در انتها حداکثر عمق آبشستگی و الگوی رسوب‌گذاری ایجاد شده در اطراف تکیه‌گاه به وسیله متر لیزری برداشت گردید. در بخش آزمایش‌های مربوط به الگوی جریان دوباره بر روی تکیه‌گاه با نسبت عرض به طول  $0/6$  که بالاترین میزان آبشستگی روی داد، آزمایشی در همان زمان و شرایط آزمایش‌های قبلی انجام و بستر رسوبی با استفاده از دوغاب سیمان تثبیت گردید و پس از تثبیت بستر جریان با همان شرایط در فلوم برقرار و در نقاط مختلف پیرامون تکیه‌گاه مؤلفه‌های سه بعدی سرعت با استفاده از دستگاه سرعت‌سنج الکترو مغناطیس برداشت و برای رسم و بررسی الگوی جریان مورد استفاده قرار گرفت. در شکل (۲-۳) ابزار لازم برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه بعدی و نحوه اندازه‌گیری سرعت نشان داده شده است (خزیمه‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۲).



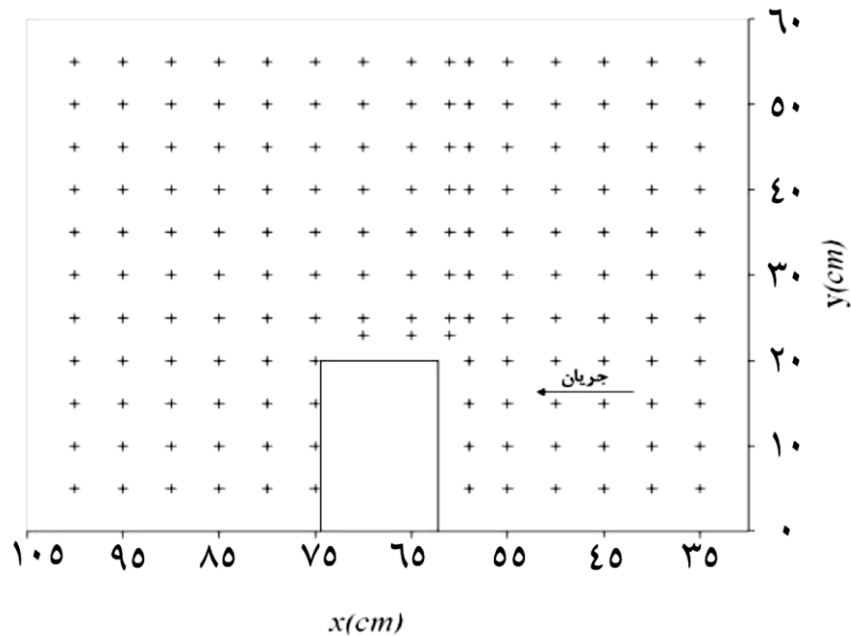
(ب)



(الف)

شکل (۲-۳) الف) سرعت سنج الکترو مغناطیس و تجهیزات مربوطه  
 ب) نحوه اندازه گیری سرعت بر روی بستر تثبیت شده به وسیله دوغاب سیمان

مؤلفه‌های سه بعدی سرعت در ۵ عمق مختلف جریان برداشت شدند که شامل ۴، ۶/۵، ۹، ۱۱/۵، ۱۴ سانتی‌متر از بستر اولیه فلوم می‌باشد. پلان شبکه برداشت نقاط اندازه‌گیری سرعت در یکی از اعماق جریان در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.



شکل (۳-۳) موقعیت نقاط اندازه‌گیری مؤلفه‌های سه بعدی سرعت در یکی از اعماق جریان

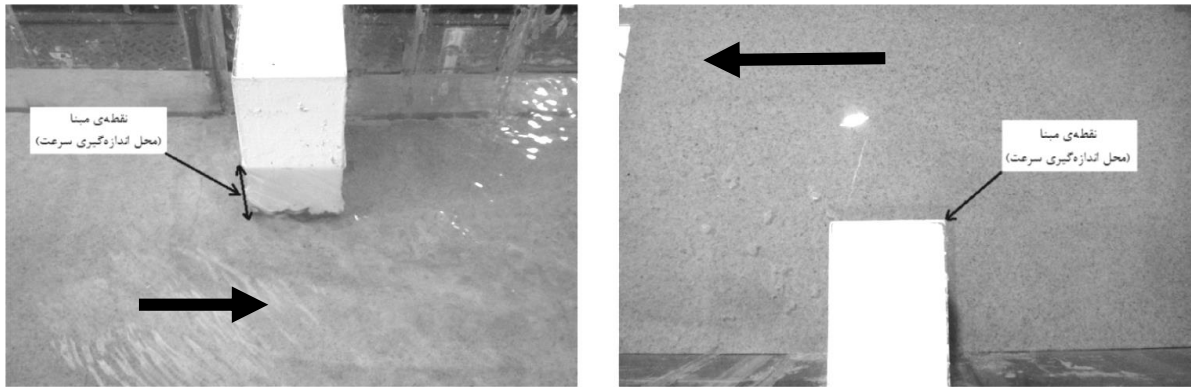
در هر نقطه بیش از ۵۰۰ سرعت مستمر در سه بعد توسط دستگاه ثبت شد. لازم به ذکر است در اعماق پایین به دلیل وجود پشته‌های رسوبی، امکان اندازه‌گیری در تعداد کمی از نقاط با محدودیت مواجه شده که با توجه به تپه‌های رسوبی و عدم وجود جریان در آن نقاط میزان سرعت صفر منظور گردید. به‌طور کلی در آزمایش‌های این مرحله در تعداد ۷۵۷ نقطه، بیش از یک میلیون مؤلفه سه بعدی سرعت ثبت گردید. همچنین میانگین سرعت‌های مستمر در هر نقطه محاسبه شد. به این ترتیب در هر یک از نقاط مورد نظر سه مؤلفه سرعت در سه بعد مختلف محاسبه و در بررسی الگوی جریان مورد استفاده قرار گرفت (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۲).

### ۳-۵- آزمایش‌های سرعت‌سنجی و تعیین الگوی جریان پیرامون تکیه‌گاه

ابتدا مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان در اعماق مختلف جریان در نقطه مبنا (گوشه بالادست) تعیین گردید و پس از آن مؤلفه‌های سه بعدی سرعت جریان پیرامون تکیه‌گاه در چند عمق مختلف برداشت و برای رسم و بررسی میدان سه بعدی جریان پیرامون تکیه‌گاه مورد استفاده قرار گرفتند.

#### ۳-۵-۱- بررسی عمقی مؤلفه‌های سرعت در نقطه مبنا

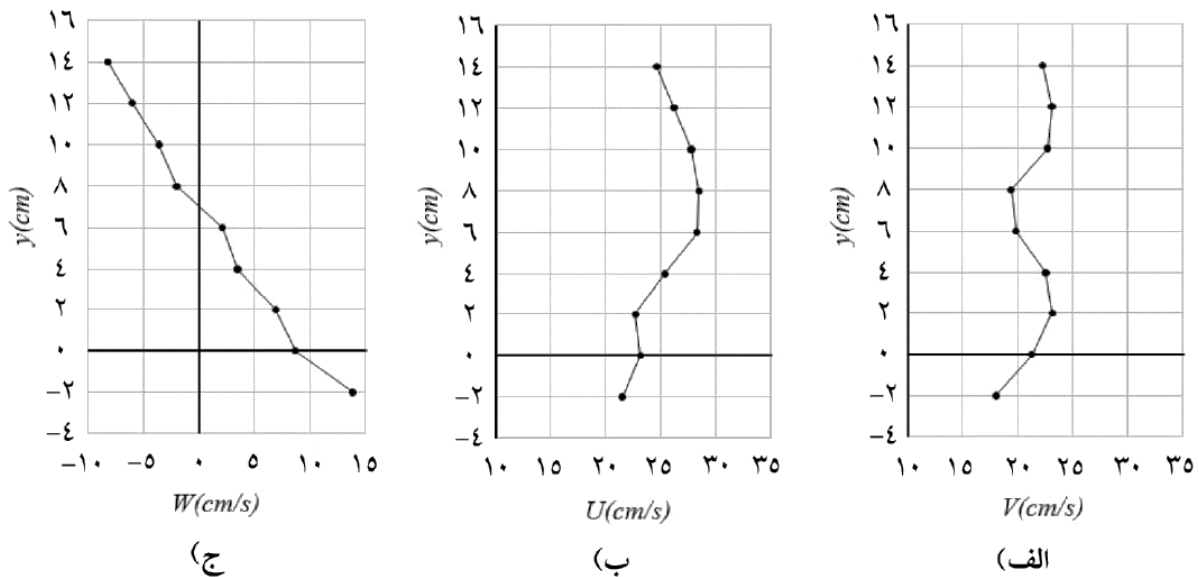
با توجه به این‌که در آزمایش‌های آبشستگی از نقطه مبنا (گوشه بالادست تکیه‌گاه) شروع شده و به تدریج بر عمق و حجم چاله آبشستگی در این نقطه افزوده می‌شود، بنابراین، این نقطه و عمق آبشستگی ایجاد شده در آن اهمیت زیادی دارد. برای بررسی توزیع سرعت در این نقطه، مؤلفه‌های سه بعدی سرعت در اعماق مختلف از سطح آب تا نزدیک کف چاله آبشستگی اندازه‌گیری شدند. در شکل (۳-۴) محل اندازه‌گیری سرعت (نقطه مبنا) و در شکل (۳-۵) پروفیل سرعت‌های طولی، عرضی و عمقی نشان داده شده است.



(ب)

(الف)

شکل (۳-۴) الف) نقطه مبنا محل اندازه‌گیری سرعت و ب) پلان از نمای مقابل



(ج)

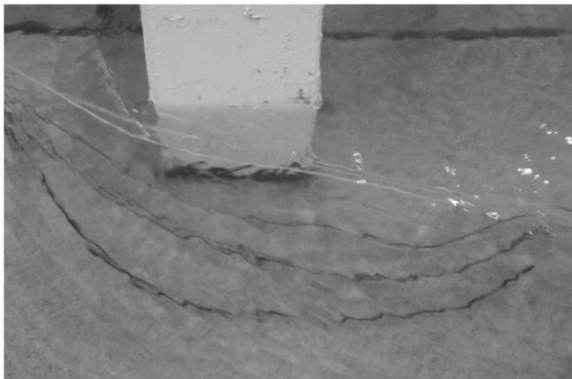
(ب)

(الف)

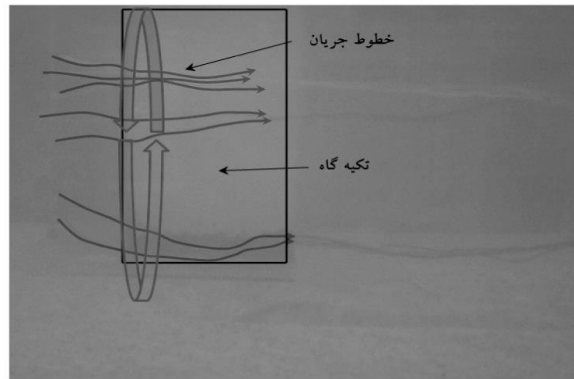
شکل (۳-۵) پروفیل سرعت در نقطه مبنا (گوشه بالادست تکیه‌گاه)

الف) سرعت طولی، ب) سرعت عرضی ج) سرعت عمقی

وجود جریان پرسرعت عرضی و طولی نیز باعث می‌شود که ذرات رسوب بلند شده از بستر، در اختیار جریان عمومی کانال قرار گرفته و به این ترتیب آبشستگی سریع در این نقطه را به وجود می‌آورند. در شکل (۳-۶-الف) پراکندگی خطوط جریان که ناشی از تلاطم به وجود آمده در اثر گرداب‌های پیرامون تکیه‌گاه می‌باشد، نشان داده شده است (خزیمه‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۲).



(ب)



(الف)

شکل (۳-۶) الف) پراکندگی خطوط جریان در اثر گرداب ایجاد شده در نقطه مبنا از نمای مقابل  
ب) انحراف خطوط جریان در اثر ایجاد سرعت عرضی از نمای بالا

همچنین مطابق شکل (۳-۶-ب) خطوط جریان پس از عبور از مقابل تکیه‌گاه، به سمت پشت تکیه‌گاه تمایل پیدا می‌کنند. در حقیقت به دلیل سرعت پایین جریان در این منطقه و حتی برگشت جریان در بعضی از لایه‌ها، گرداب‌های افقی شکل می‌گیرند که در منابع با عنوان گرداب‌های برخاستگی شناخته می‌شوند. این گرداب‌ها پتانسیل رسوب‌گذاری دارند و به همین دلیل است که تپه‌های رسوبی در این منطقه نهشته می‌شوند (خزیمه‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۲).

### ۳-۶- نتایج آبشستگی آزمایش‌ها

در این مرحله ابتدا سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب، بدون حضور تکیه‌گاه تعیین شد. یکی از روش‌های تعیین سرعت آستانه‌ی حرکت، استفاده از سرعت بحرانی است. سرعت بحرانی جریان با برقراری دبی ثابت و کاهش تدریجی عمق جریان، در چند مرحله محاسبه گردید. مقدار سرعت آستانه‌ی حرکت برابر  $0.28$  متر بر ثانیه تعیین شد. درستی مقدار تعیین شده برای سرعت آستانه‌ی حرکت با تعدادی از روابط تجربی مقایسه شد. از جمله‌ی این روابط تجربی رابطه‌ی نیل (۱۹۶۸) است؛ نیل (به نقل از ارونقی و همکاران، ۱۳۸۸) برای محاسبه‌ی سرعت بحرانی رابطه‌ی (۳-۳) را مطرح کرده است.

$$V_c = 31.08 K_u \theta_c^{1/2} y^{1/6} d_{50}^{1/3} \quad (3-3)$$

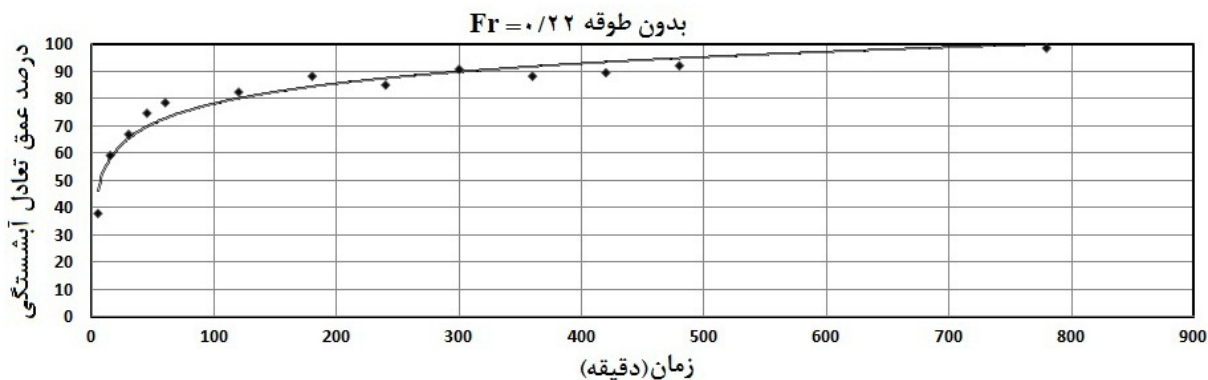
که در آن:

$V_c$ : سرعت بحرانی بر حسب متر بر ثانیه  $y$ : عمق آب بر حسب متر  $d_{50}$ : اندازه‌ی متوسط ذرات بر حسب متر و  $K_u$ : ضریب ثابت و مقدار آن در سیستم متریک ۱ و در سیستم انگلیسی ۱/۸۱ می‌باشد.  $\theta_c$ : پارامتر شیلدز بحرانی است که از دیاگرام شیلدز قابل محاسبه است. پس از تعیین سرعت آستانه‌ی حرکت، چهار آزمایش (برای هر عدد فرود یک آزمایش) به مدت زمان ۱۳ ساعت انجام گردید. در طول مدت آزمایش در زمان‌های مختلف عمق آبشستگی در نقطه‌ی مبنا برداشت گردید. با فرض اینکه در زمان ۱۳ ساعت ۹۹ درصد عمق تعادل آبشستگی اتفاق بیفتد لذا عمق آبشستگی در زمان‌های مختلف به درصد عمق تعادل آبشستگی تبدیل شد. در شکل (۷-۳) نتایج یکی از این آزمایش‌ها نشان داده شده است. در شکل (۷-۳) محور عمودی، درصد عمق تعادل آبشستگی و محور افقی زمان آزمایش می‌باشد. در تمامی این آزمایش‌ها، شروع آبشستگی از گوشه‌ی بالادست تکیه‌گاه بود، در ابتدا به سرعت بر عمق آبشستگی افزوده شد، به طوری که مطابق شکل (۷-۳) در یک ساعت اول آزمایش حدود ۷۹ درصد عمق آبشستگی اتفاق افتاد، پس از آن میزان آبشستگی به تدریج کاهش پیدا کرد. از ساعت سوم به بعد، مقدار بسیار کمی بر عمق آبشستگی افزوده شد. در طول آزمایش، رسوبات از دیواره چاله‌ی آبشستگی به درون چاله ریزش کرده و پس از حمل درون آن به پشت‌هی رسوب پایین-دست افزوده می‌شدند. پشت‌هی رسوبی به تدریج به سمت پایین‌دست حرکت کرده و به این ترتیب توسعه‌ی چاله‌ی آبشستگی در طول زمان آزمایش مرتباً ادامه پیدا می‌کرد. در تحقیق حاضر فرض بر این بود که ۹۹ درصد عمق تعادل آبشستگی (عمق نهایی آبشستگی) در مدت زمان سیزده ساعت اتفاق می‌افتد. در این صورت مطابق شکل (۷-۳) حدود ۹۱ درصد عمق تعادل آبشستگی در مدت زمان ۵ ساعت اتفاق می‌افتد و در نتیجه در تحقیق حاضر، مدت زمان ۵ ساعت به عنوان زمان آزمایش برای تمامی آزمایش‌ها انتخاب گردید. برای ۳ آزمایش دیگر نیز نمودارهایی مشابه نمودار شکل (۷-۳) استخراج گردید. در سه آزمایش دیگر با اعداد فرود ۰/۲۰، ۰/۱۸ و ۰/۱۵ در زمان ۵ ساعت به ترتیب



۹۲، ۹۴ و ۹۶ درصد عمق تعادل آبشستگی اتفاق افتاد. یکی دیگر از نکاتی که در نتایج این سری از آزمایش‌ها شاهد نهفته است، این است که با کاهش عدد فرود، زمان رسیدن به عمق تعادل آبشستگی کاهش می‌یابد (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۱).

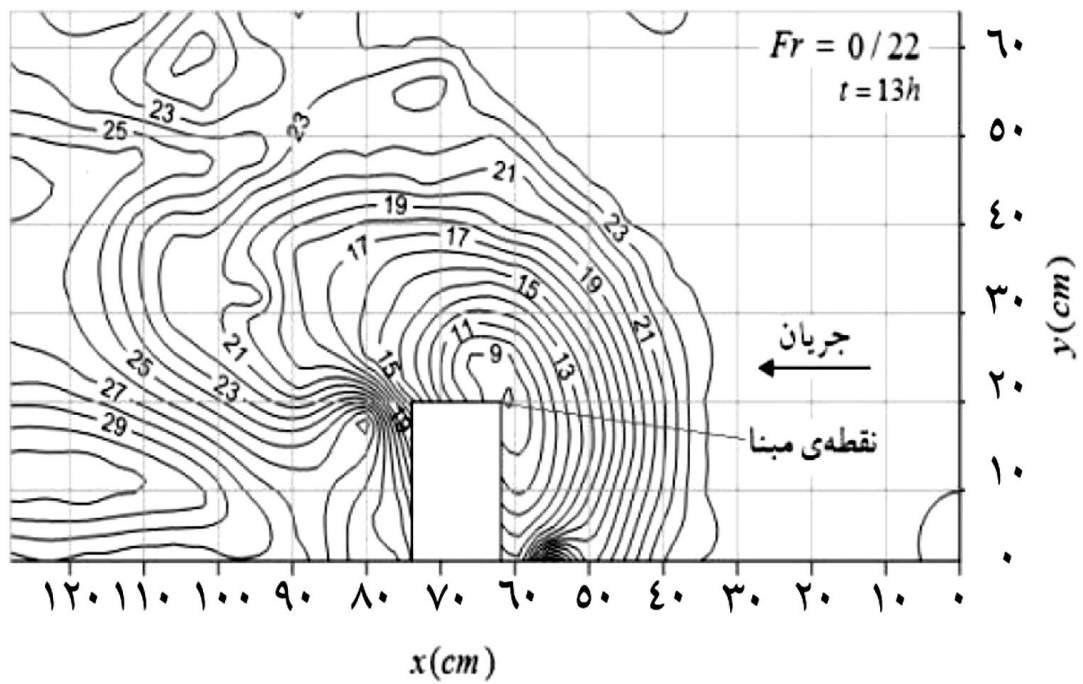
در مرحله‌ی دوم آزمایش‌های شاهد، چهار آزمایش دیگر به مدت زمان پنج ساعت برای چهار عدد فرود مختلف جریان انجام گردید و عمق آبشستگی در نقطه‌ی مبنا، برداشت گردید. نتایج این چهار آزمایش برای مقایسه عملکرد طوقه‌ها به‌عنوان شاهد و مبنا مورد استفاده قرار گرفتند. الگوی رسوب‌گذاری و فرسایش به‌وسیله‌ی متر لیزری برداشت گردید. همان‌طور که قبلاً گفته شد حداکثر عمق آبشستگی در گوشه‌ی بالادست تکیه‌گاه اتفاق افتاد (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۱).



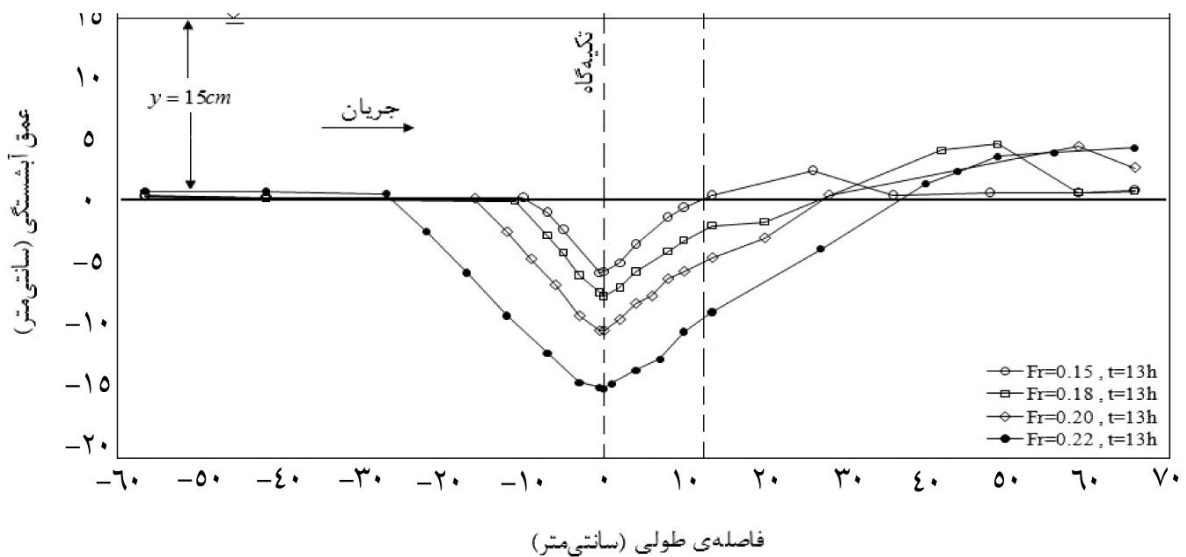
شکل (۷-۳) تغییر عمق آبشستگی در مقابل زمان بدون حضور طوقه در  $Fr = 0.22$

مطابق شکل حداکثر عمق چاله آبشستگی در گوشه بالادست تکیه‌گاه که به‌عنوان نقطه مبنا نام‌گذاری گردید، اتفاق افتاده است. چاله آبشستگی به سمت بالادست نیز توسعه یافته و با افزایش عدد فرود بر وسعت چاله افزوده می‌شود. الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری پیرامون تکیه‌گاه در شکل (۸-۳) نشان داده شده است.

در آزمایش‌های ۱۳ ساعته ۹۱، ۹۲، ۹۴، ۹۶ درصد عمق تعادل آبشستگی به ترتیب در اعداد فرود ۰/۲۲، ۰/۲۰، ۰/۱۸ و ۰/۱۵ اتفاق افتاد. در شکل (۹-۳) پروفیل رسوبات بستر پیرامون تکیه‌گاه در شرایط مختلف جریان نشان داده شده است (خزیمه نژاد و همکاران، ۱۳۹۲).



شکل (۸-۳) الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری پیرامون تکیه‌گاه در عدد فرود ۰/۲۲



شکل (۹-۳) پروفیل رسوبات بستر پیرامون تکیه‌گاه در شرایط مختلف جریان

### ۳-۷- مدل عددی

بیشتر مطالعات و تحقیقات انجام شده در زمینه آبشستگی به صورت مدل فیزیکی بوده و مطالعات مربوط به تعیین عمق آبشستگی نیز بر اساس این مدل‌ها ارائه شده‌اند ولی متأسفانه نتایج حاصل از مدل‌های فیزیکی در اغلب موارد منطقی و قابل قبول نمی‌باشند، زیرا در این تحقیقات بسیاری از پیچیدگی‌های محدوده جریان در اطراف پایه‌های پل بسیار ساده در نظر گرفته شده و از بسیاری از پارامترها صرف نظر می‌شود. برخلاف مدل‌های فیزیکی که همواره تحت تأثیر عامل مقیاس بوده و محدودیت‌هایی دارند، مدل‌های عددی بر اساس ابعاد واقعی عمل نموده و از شرایط خاص جهت تعیین سرعت جریان متلاطم و آبشستگی بستر استفاده می‌نمایند (آریان فر و همکاران، ۱۳۸۸).

### ۳-۷-۱- مدل عددی فلوئنت

فلوئنت یک نرم‌افزار قدرتمند در تحلیل سیالات به صورت تک فازی (داخل لوله) و چند فازی (دارای سطح آزاد) می‌باشد. این نرم‌افزار قابلیت ساخت شبکه و مش بندی را ندارد و شبکه‌های مورد نیاز خود را از نرم‌افزارهای دیگر مانند گمبیت وارد می‌کند. در ادامه مراحل مدل‌سازی با مدل عددی فلوئنت تشریح می‌گردد.

### ۳-۷-۲- مراحل مدل‌سازی با فلوئنت

#### ۳-۷-۲-۱- طراحی شبکه و مش بندی با نرم‌افزار پیش پردازنده

با توجه به اینکه نرم‌افزار فلوئنت شبکه مورد نیاز برای جریان و مش بندی آن را از نرم‌افزارهای دیگر وارد می‌کند. اولین گام برای مدل‌سازی با فلوئنت طراحی شبکه و مش بندی و همچنین تعیین

شرایط مرزی شبکه می‌باشد. در این تحقیق از نرم‌افزار گمبیت (Gambit) به‌عنوان پیش پردازنده استفاده شده است که قابلیت طراحی هندسه شبکه و مش بندی و تعیین شرایط مرزی را دارد و در پایان شبکه طراحی شده را به نرم‌افزار فلونت اختصاص می‌دهد.

### ۳-۲-۷-۲- وارد کردن شبکه ساخته شده توسط نرم‌افزار پیش پردازنده

شبکه طراحی شده توسط نرم‌افزار گمبیت باید توسط فلونت فراخوانی (import) شده و آمادگی آن برای تحلیل مورد بررسی قرار گیرد. هرچند تعیین شرایط مرزی در نرم‌افزار پیش پردازنده صورت می‌گیرد اما نرم‌افزار فلونت هم قابلیت تغییر شرایط مرزی را دارد.

### ۳-۲-۷-۳- تعیین شرایط اولیه جریان

هدف ما در این تحقیق مقایسه مدل عددی آبشستگی با مدل آزمایشگاهی می‌باشد لذا باید در تعیین شرایط اولیه جریان بیشترین سعی بر تطبیق هرچه بیشتر مدل عددی با مدل آزمایشگاهی باشد. این امر باعث می‌شود نتایج حاصل شده در مدل عددی با مدل آزمایشگاهی اختلاف کمتری داشته باشد.

### ۳-۲-۷-۴- تنظیم پارامترها

مهم‌ترین قسمت مدل‌سازی تنظیم پارامترهای جریان می‌باشد. در مدل‌سازی عددی با فلونت پارامترهای زیادی تعیین می‌گردد. از جمله این پارامترها خصوصیات سیال، جهت گرانس زمین و شیب کانال، مدل آشفتگی و... می‌باشد.

### ۳-۷-۲-۵- شبیه‌سازی جریان و نتیجه گیری

پس از تنظیم پارامترها با اجرای شبیه‌سازی، نتایج در قالب نمودارها و شکل‌های مورد نظر حاصل می‌شود. باید توجه داشت که مدل‌سازی در صورتی قابل بررسی خواهد بود که نمودارها همگرا شود.

### ۳-۷-۳- گمبیت (Gambit)

نرم‌افزار گمبیت یک نرم‌افزار پیش پردازنده می‌باشد که برای ساختن شبکه‌ها، تعیین شرایط مرزی و ورود به نرم‌افزارهای دیگر می‌باشد و شامل چند بخش کلی می‌باشد.

### ۳-۷-۳-۱- بخش‌های مختلف گمبیت (Gambit)

- ۱- File شامل قسمت‌های عمومی نرم‌افزار می‌باشد.
- ۲- Edit برای تنظیمات عمومی نرم‌افزار است.
- ۳- Solver که به منظور اختصاص شبکه طراحی شده به نرم‌افزارهای تحلیلگر مختلف مانند فلونت (Fluent) می‌باشد.
- ۴- صفحه گرافیکی که برای نمایش سه بعدی شبکه و اعمال تغییرات روی آن می‌باشد که به صورت چهار وجهی نمایش داده می‌شود.
- ۵- صفحه ابزار که اصلی‌ترین قسمت نرم‌افزار را تشکیل می‌دهد و در چهار قسمت کلی تقسیم می‌شود و شامل هندسه (geometry)، مش بندی (mesh)، شرایط مرزی (zones) و ابزارها (tools) می‌باشد.

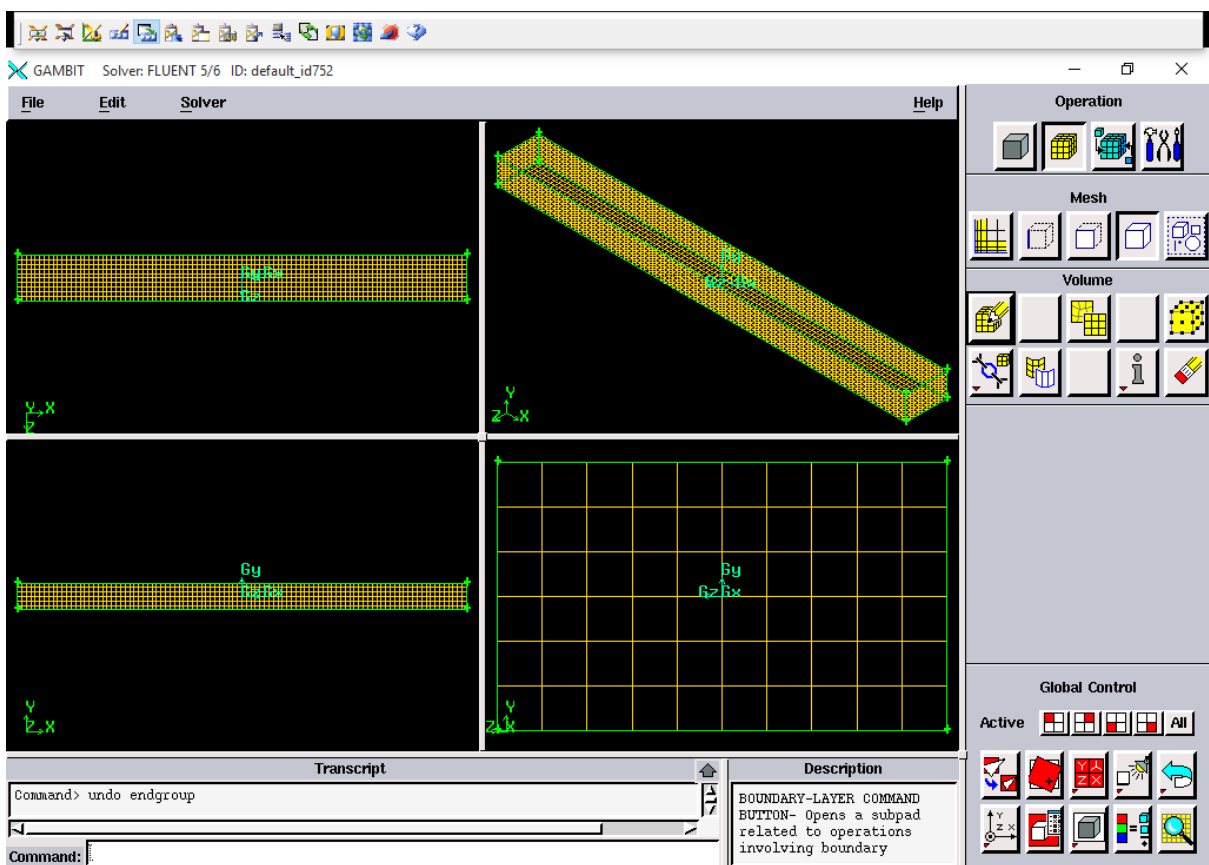
۶- صفحه تنظیمات کلی (global control) نرم افزار که به منظور تنظیمات کلی نمایش صفحه

گرافیکی نرم افزار گمبیت می باشد.

۷- توضیحات (description) که عملکرد هر یک از ابزارهای نرم افزار را توضیح می دهد.

۸- رونوشت (transcript) فهرستی از کلیه عملیات صورت گرفته را ذخیره و ارائه می دهد.

در شکل (۳-۱۲) نمای کلی نرم افزار گمبیت نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۰) نمای کلی نرم افزار Gambit

### ۳-۷-۳-۲- مراحل کار با گمبیت

مرحله اول: بعد از باز کردن یک صفحه جدید، ابتدا هندسه شکل (geometry) در قالب نقطه، خط، صفحه و حجم با استفاده از ابزارهای ارائه شده ترسیم می‌شود.

مرحله دوم: تعیین مش‌بندی (mesh) که با توجه به دقت مورد نیاز در تحلیل و همچنین نوع مش بندی متناسب با معادلات جریان مش‌بندی انجام می‌شود.

مرحله سوم: بعد از مش بندی نوع خروجی (solver) برای نرم‌افزار تحلیلگر مشخص می‌شود که ما در اینجا Fluent 5.6 را به عنوان نرم‌افزار تحلیلگر انتخاب می‌کنیم. باید توجه داشت که شرایط مرزی برای هر یک از نرم‌افزارهای تحلیلگر متفاوت است.

مرحله چهارم: تعیین شرایط مرزی (zones) که با توجه به جهت جریان دیواره‌ها (wall) و ورودی جریان (velocity-inlet) و خروجی جریان (outflow) و سایر شرایط مرزی متناسب با جریان تعیین می‌شود.

مرحله پنجم: ساختن فایل خروجی (export) با پسوند "mesh" تا برای نرم‌افزار تحلیلگر فلوئنت قابل شناسایی باشد.

### ۳-۷-۳-۳- نقاط ضعف گمبیت

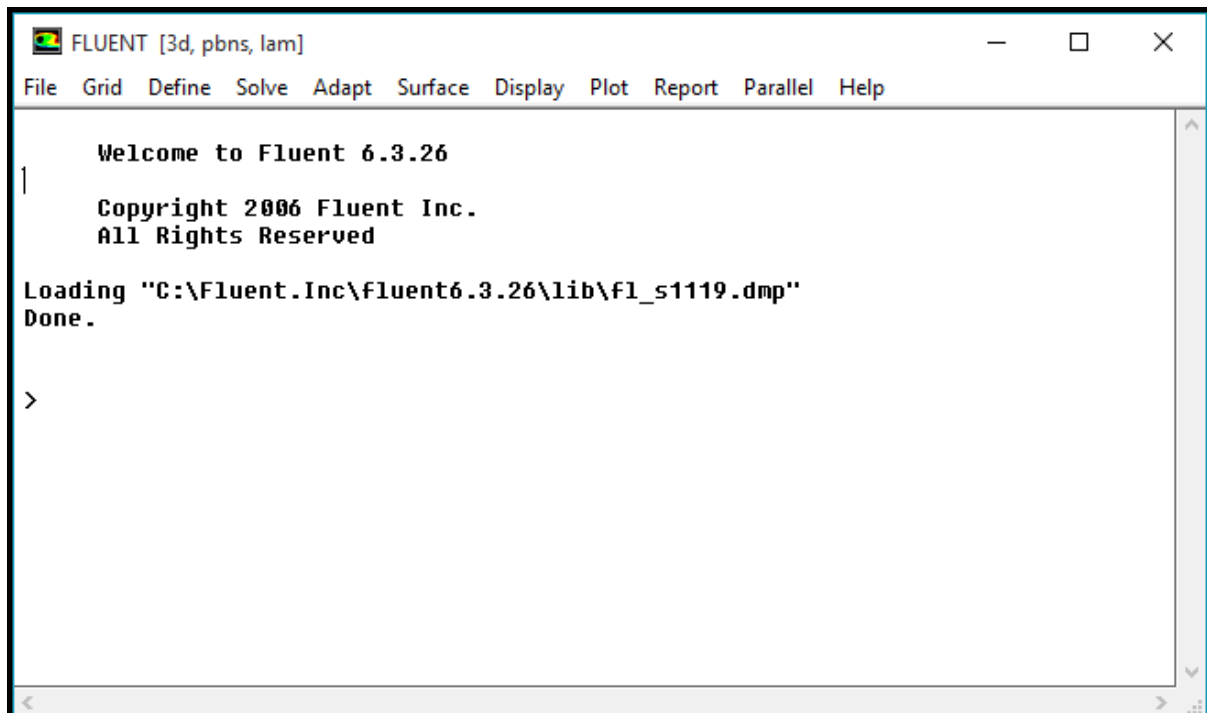
گرچه گمبیت یکی از توانمندترین نرم‌افزارها در زمینه ساختن شبکه و مش بندی می‌باشد مزایای زیادی نسبت به سایر نرم‌افزارها دارد اما دارای نقاط ضعفی نیز می‌باشد. عمده نقاط ضعف این نرم‌افزار به این دلیل است که این نرم‌افزار توسط مهندسين سيالات طراحي شده نه کارشناسان نرم‌افزار، به همین دلیل عمده مشکلات این نرم‌افزار در بخش عمومی نرم‌افزار است.

نقاط ضعف نرم‌افزار گمبیت عبارت است از:

- ۱- لزوم فعال بودن نرم‌افزار exceed در هنگام فعالیت گمبیت
- ۲- قدیمی بودن منوها و اشل‌ها
- ۳- محدود بودن در بخش save و محدودیت ذخیره در مسیرهای مشخص و غیرقابل تغییر
- ۴- خارج از صفحه بودن پنجره‌های کاربردی

### ۳-۷-۴- مراحل مدل‌سازی و تحلیل با Fluent

صفحه اولیه نرم‌افزار فلوئنت یک صفحه ساده بدون هیچ شکل و قالب خاصی و فقط شامل چندین منو می‌باشد که تنظیمات مدل‌سازی توسط آنها انجام می‌شود. در ادامه بخش‌های مختلف منو و نحوه تنظیمات آن تشریح می‌شود.



شکل (۳-۱۱) نمای کلی نرم‌افزار Fluent

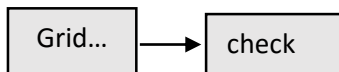


### ۳-۷-۴-۱- مرحله اول: شبکه

۱- وارد کردن شبکه ساخته شده توسط نرم افزار پیش پردازنده

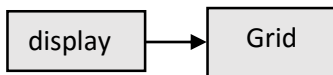


۲- کنترل شبکه ورودی

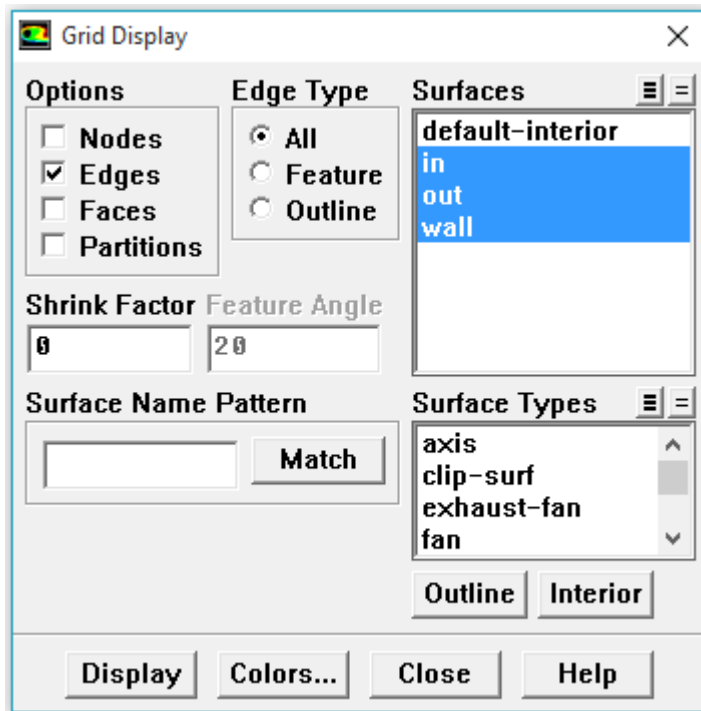


با این عملیات گزارشی از شبکه وارد شده ارائه می شود. مهم ترین کنترل این قسمت نبودن حجم منفی در شبکه می باشد.

۳- نمایش شبکه



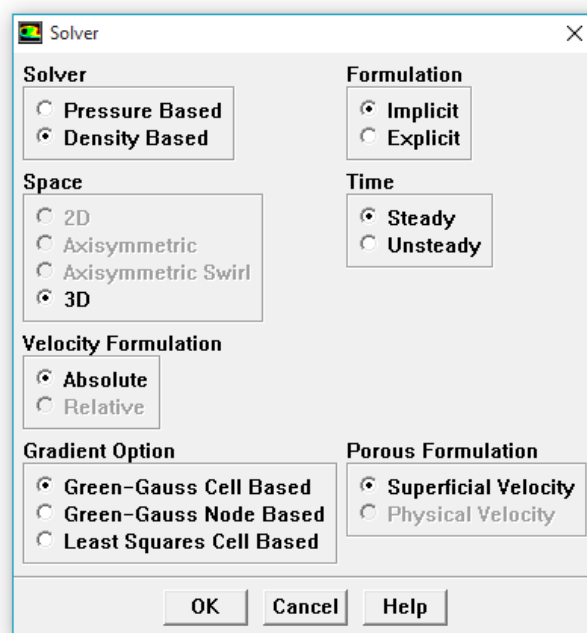
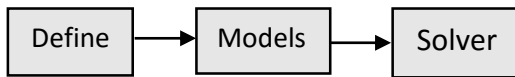
در این قسمت با تعیین ناحیه مورد نظر برای نمایش و display کردن شبکه به نمایش در می آید.



شکل (۳-۱۲) صفحه کنترل هندسه تعریف شده

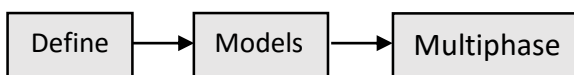
### ۳-۷-۴-۲- مرحله دوم: مدل

۱- مشخص کردن مدل

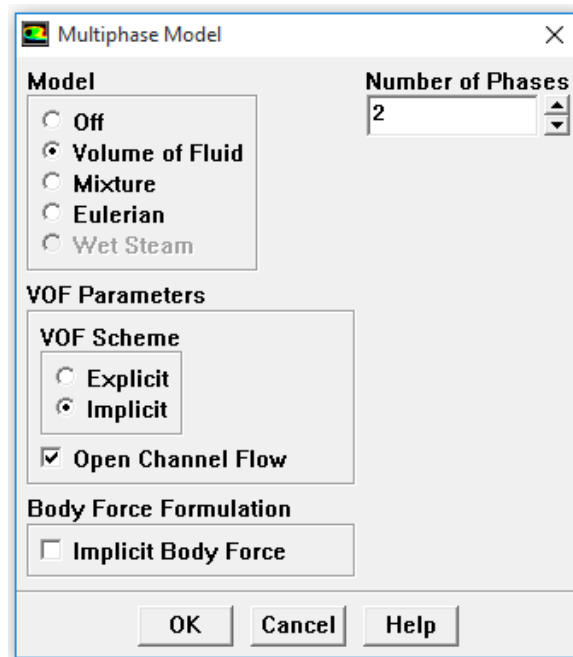


شکل (۳-۱۳) تعیین نوع پایداری و سه بعدی بودن جریان

۲- فعال کردن نوع حل و تعداد فاز



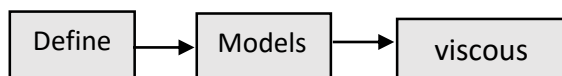
در این قسمت برای آبشستگی مدل Eulerian فعال می‌شود.

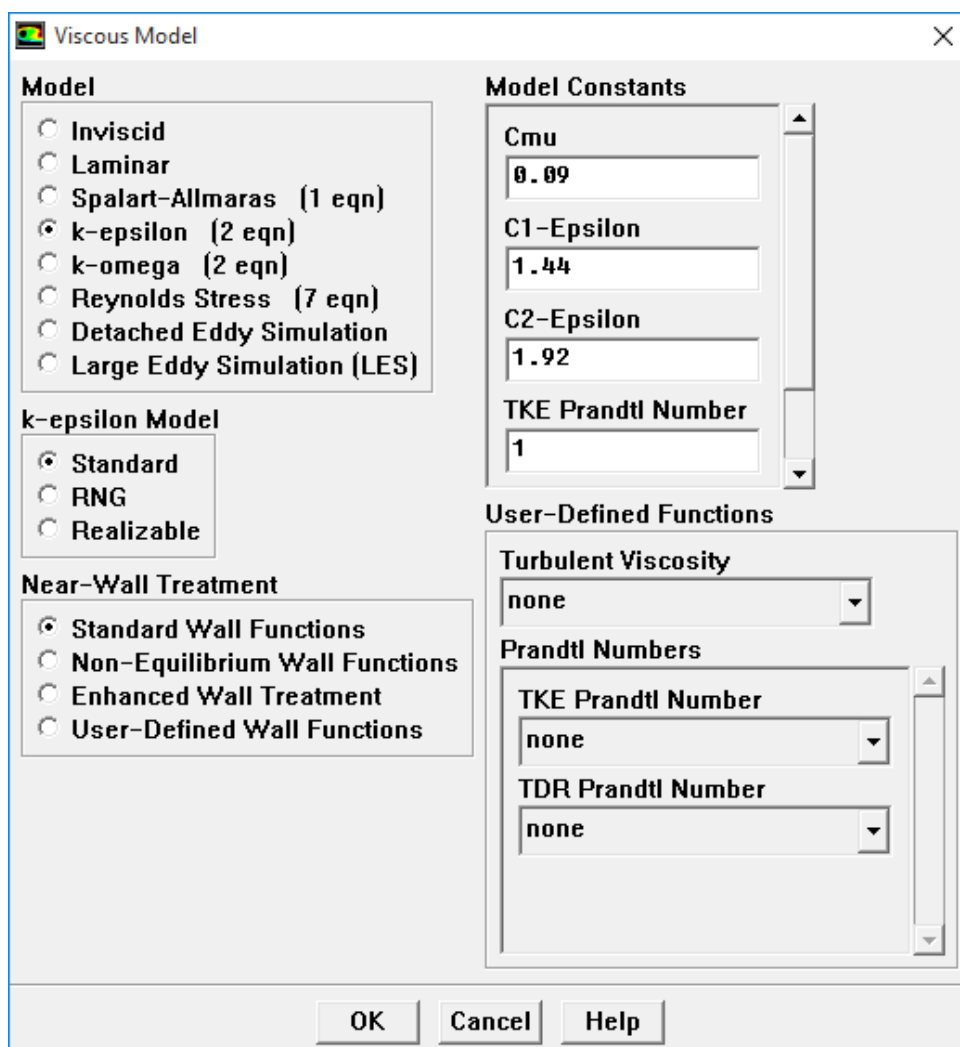


شکل (۳-۱۴) تعیین نوع تحلیل و تعداد فاز

۳- تعیین نوع جریان

نوع جریان از نظر تأثیر ویسکوزیته (خطی یا آشفته) و همچنین نوع آشفتگی مشخص می‌شود.

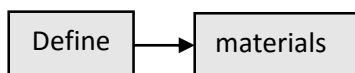




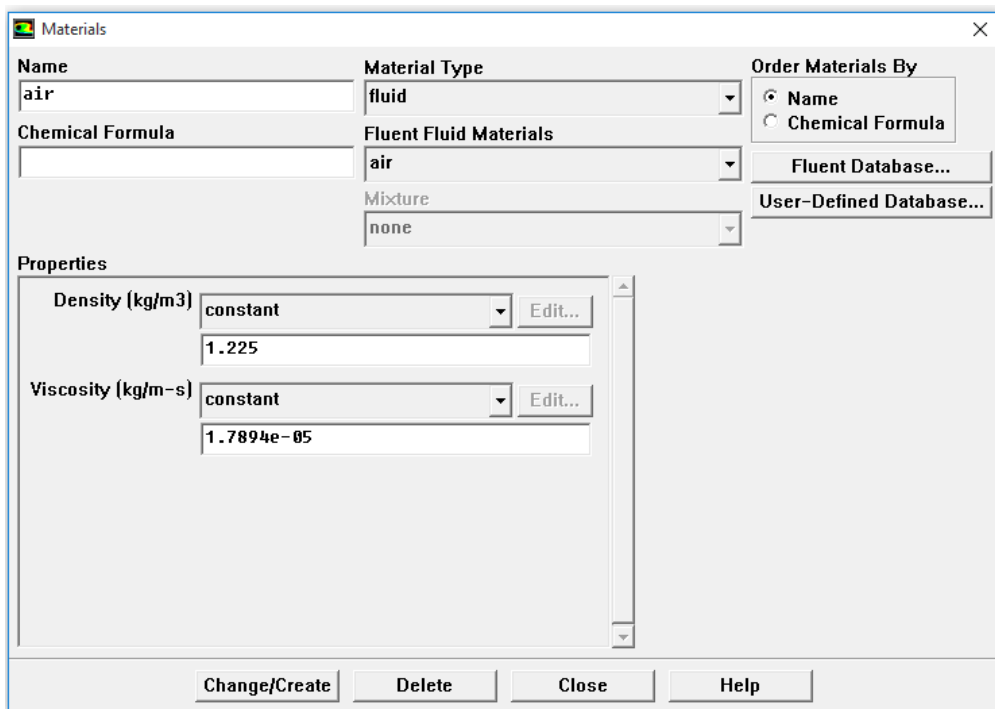
شکل (۳-۱۵) تعیین نوع ویسکوزیته و خصوصیات آن

### ۳-۴-۷-۳- مرحله سوم: مواد

تعیین نوع سیال‌ها

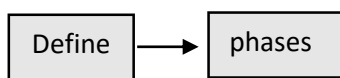


در این قسمت نوع سیال‌ها تعیین می‌شود و در صورتی که سیال مورد نظر در لیست نباشد آن سیال را از Fluent database انتخاب و کپی می‌کنیم.

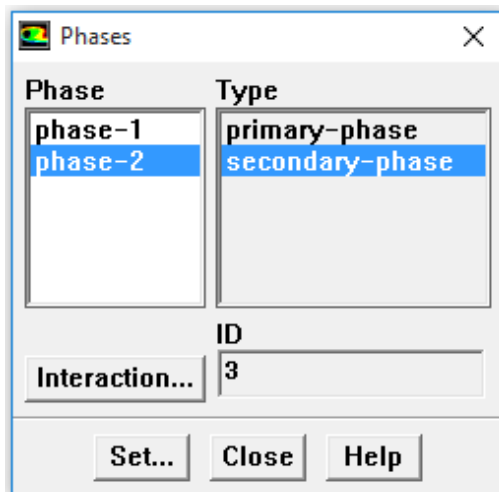


شکل (۳-۱۶) تعیین سیال و مواد در Fluent

### ۳-۷-۴- مرحله چهارم: تعیین فازها

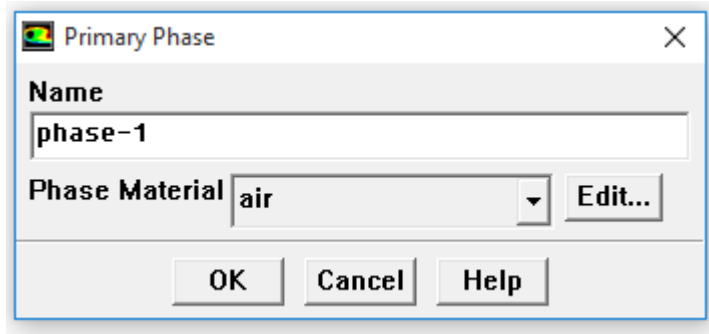


در این قسمت سیالات مورد نظر به عنوان فاز اولیه و ثانویه و... تعیین می‌شوند.



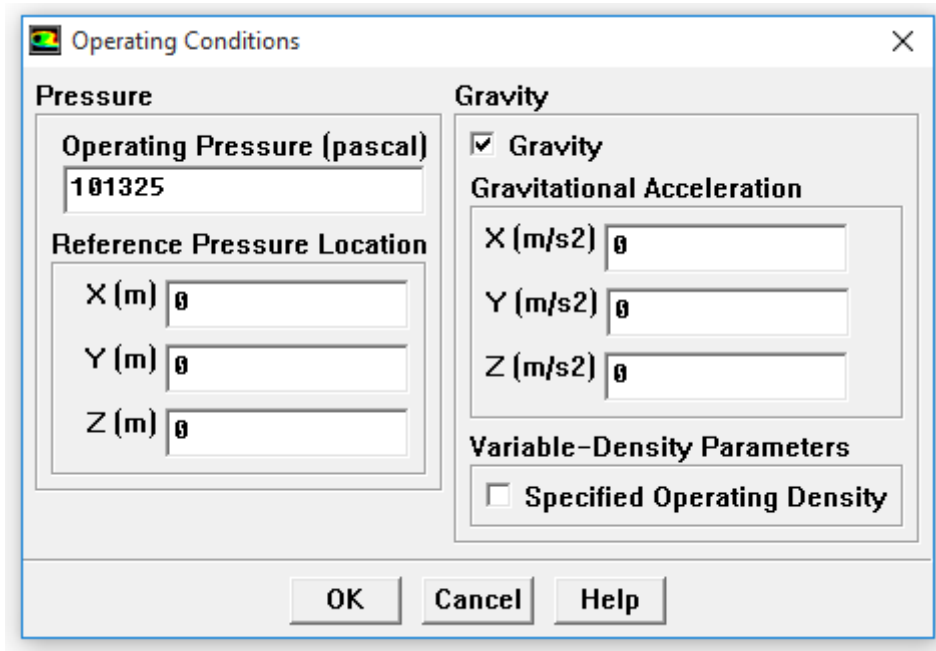
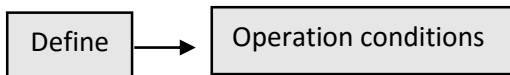
شکل (۳-۱۷) تعیین فازها

بعد از تعیین فاز اولیه یا ثانویه سیال مورد نظر را به آن اختصاص می‌دهیم.



شکل (۱۸-۳) تعیین فاز اولیه و ثانویه

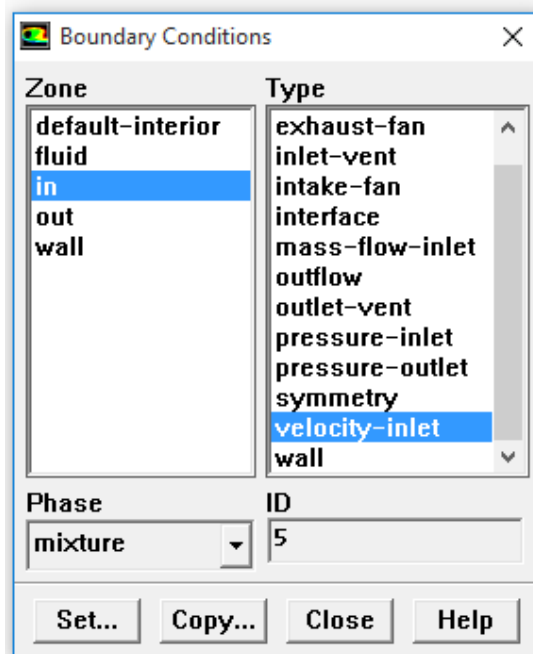
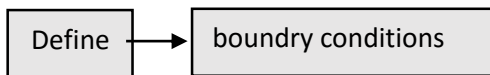
### ۳-۷-۴-۵- مرحله پنجم: تعیین شرایط اولیه جریان



شکل (۱۹-۳) تعیین شرایط گرانش زمین و جهت آن و شیب کانال

در این قسمت شرایط اولیه جریان از جمله فشار اولیه و همچنین وجود و مقدار گرانش تعیین می‌گردد.

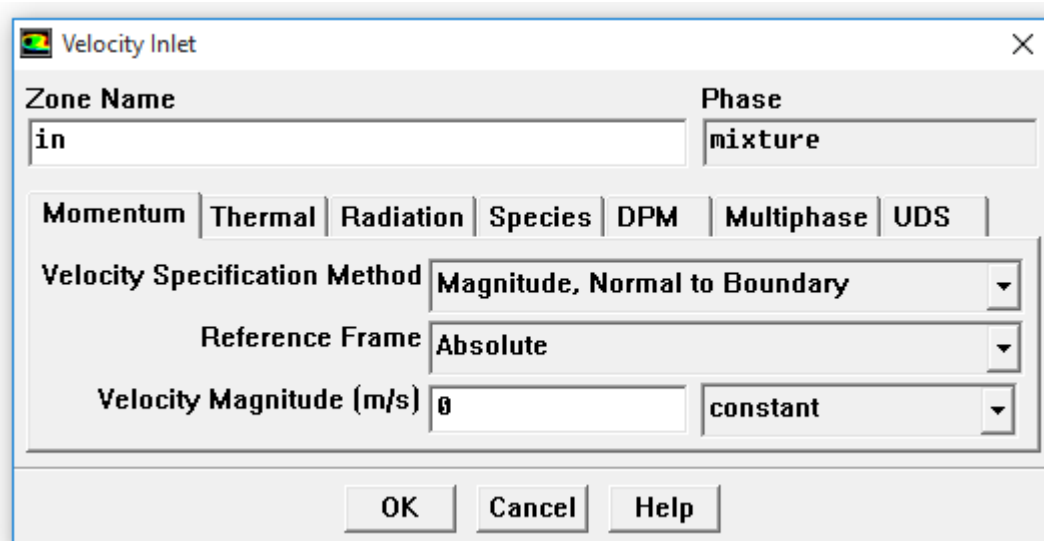
۳-۷-۴-۶- مرحله ششم: تعیین شرایط مرزی



شکل (۳-۲۰) تعیین شرایط مرزی

در این قسمت مشخصات شرایط مرزی مشخص می‌شود.

در قسمت ورودی جریان و سرعت جریان مشخص می‌شود.



شکل (۳-۲۱) تعیین دبی ورودی جریان

### ۳-۸- نرم افزار Tecplot

نرم افزار Tecplot از جمله نرم افزارهای ترسیمی قدرتمند می باشد که در بسیاری از رشته های مهندسی و علوم پایه از آن استفاده می شود. از قابلیت های آن راحتی کار با این نرم افزار، امکان ورود داده ها با فرمت های مختلف و قابلیت ترسیم دو بعدی، سه بعدی و ایجاد انیمیشن و انجام محاسبات مربوط به دینامیک سیالات را می توان نام برد. به دلیل اینکه نمایش نتایج به دست آمده آبستگي در نرم افزار فلوئنت چندان واضح نیست، نتایج به دست آمده از فلوئنت توسط نرم افزار Tecplot تحلیل می-شوند (محبوب و همکاران، ۱۳۹۲).



# فصل چهارم

## بحث و نتایج

#### ۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا در قسمت اول با استفاده از داده‌های مدل آزمایشگاهی مدل عددی فلوئنت مورد واسنجی قرار گرفته است و الگوی آبشستگی رسوب در اطراف تکیه‌گاه توسط مدل عددی فلوئنت به صورت دو فازی بررسی و با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است و در قسمت دوم بستر تثبیت شده با دوغاب سیمان پس از آبشستگی در مدل آزمایشگاهی به وسیله Gambit طراحی و مش بندی شده و مدل سازی جریان در بستر طراحی شده در زمان یک ساعت پس از شروع آبشستگی به صورت تک فازی انجام شده است و سرعت‌های طولی، عرضی و عمقی محاسبه و با استفاده از نمودار با مقادیر مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است.

#### ۴-۲- داده‌های ورودی به مدل

همان طوری که در فصل ۳ اشاره شد از داده‌های هیدرولیکی مدل فیزیکی شامل اندازه‌گیری سرعت جریان و عمق آبشستگی، برای اجرای مدل عددی استفاده شده است. برای اجرای مدل عددی ابتدا مدل سازی بدون تکیه‌گاه و فقط برای بدست آوردن ضریب‌های مؤثر در آبشستگی با همان شرایط هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی صورت گرفته است. این مقادیر شامل ضرایب لیفت، درگ، استرومال و ضریب اصطکاک داخلی رسوب می‌باشد.

با توجه به اینکه در مدل آزمایشگاهی سرعت آستانه حرکت  $28 \text{ cm/s}$  تعیین شده است ابتدا مدل سازی آبشستگی بدون تکیه‌گاه با این سرعت انجام شده و با تغییر در خصوصیات عوامل مؤثر در آبشستگی این مقادیر مورد نیاز مدل عددی تخمین زده شد.

## ۴-۳- عامل‌های مؤثر در مدل‌سازی عددی

عامل‌های مورد نیاز مدل‌سازی عددی که بعضی از آنها در مدل آزمایشگاهی تعیین شده و بعضی از آنها بر اساس شرایط موجود به صورت پیش‌فرض در مدل عددی در نظر گرفته شده است. به همین منظور علاوه بر اطلاعات موجود از مدل آزمایشگاهی، سایر داده‌های مورد نیاز متناسب با شرایط مدل آزمایشگاهی تخمین زده شده است.

داده‌های مورد نیاز در مدل‌سازی عددی به چهار دسته تقسیم می‌شوند.

۱- عامل‌های هیدرولیکی

۲- عامل‌های سیال

۳- عامل‌های رسوب

۴- عامل‌های تراکنش بین رسوب و سیال

## ۴-۳-۱- عامل‌های هیدرولیکی

- عمق جریان در بالادست که در مدل آزمایشگاهی ۰/۱۵ متر می‌باشد.
- سرعت متوسط جریان در بالادست که در مدل آزمایشگاهی ۰/۲۸ متر بر ثانیه است.
- شیب کانال (S) که در مدل آزمایشگاهی ۰/۰۰۰۳ می‌باشد.
- دبی جریان در واحد عرض (q) که در مدل آزمایشگاهی ۴۰ لیتر بر ثانیه می‌باشد.
- سطح مقطع جریان (A) و شکل کانال که به صورت مستطیلی و برابر ۰/۱۵ مترمربع است.

#### ۴-۳-۲- عامل های سیال

- جرم واحد حجم ( $\rho$ ) پیش فرض مدل عددی  $998 \text{ kg/m}^3$  است.
- شتاب ثقل زمین ( $g$ ) که پیش فرض مدل عددی  $9.81 \text{ m/s}^2$  می باشد.
- لزجت سینماتیکی ( $\mu$ ) که پیش فرض مدل عددی  $0.001 \text{ kg/m-s}$  می باشد.

#### ۴-۳-۳- عامل های رسوب

در مدل آزمایشگاهی تنها مقدار اندازه گیری شده، اندازه و جرم واحد حجم رسوب بوده و سایر شرایط با پیش فرض خصوصیات رسوب موجود در نظر گرفته شده است. در حالی که در مدل سازی عددی باید تمام خصوصیات رسوب در مدل عددی وارد شود که این خصوصیات عبارتند از:

- اندازه مواد رسوبی ( $d_{50}$ ) که در مدل آزمایشگاهی برابر  $0.76 \text{ mm}$  می باشد.
- جرم واحد حجم رسوب ( $\rho_s$ ) که در مدل آزمایشگاهی  $2650 \text{ kg/m}^3$  می باشد.
- میزان چسبندگی ذرات رسوب که در این مدل صفر در نظر گرفته شده است.
- زاویه ایستایی رسوب ( $\phi$ )  $30^\circ$  درجه تخمین زده شده است.

#### ۴-۳-۴- عامل های تراکنش بین رسوب و سیال

که بر اساس نظر زارع و دهدشت به صورت تخمینی تعیین شده است.

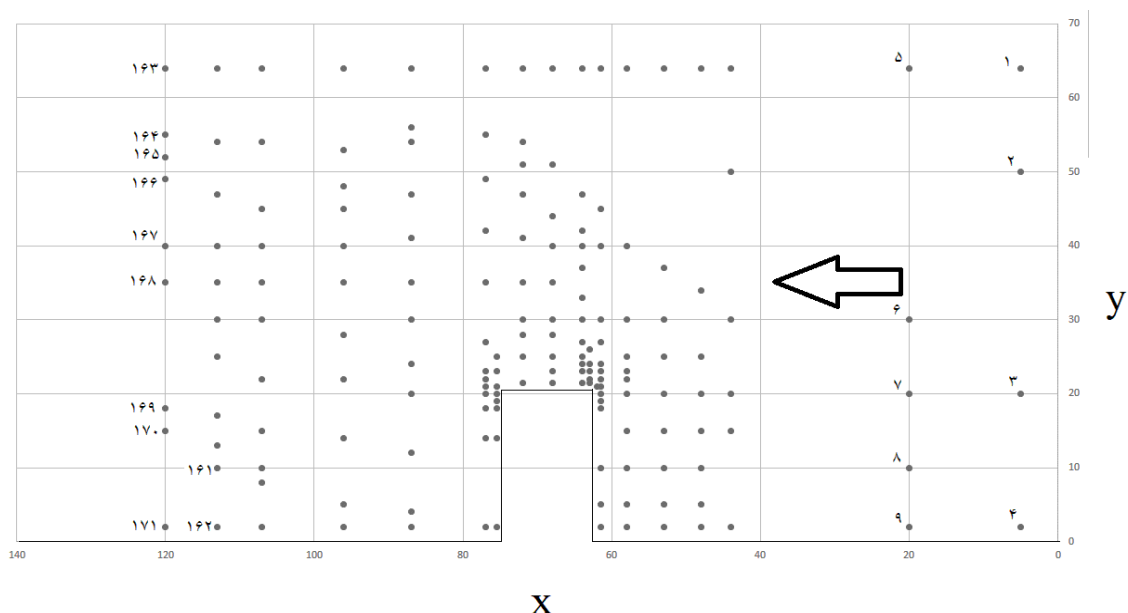
- ضریب درگ  $1/2$
- ضریب لیفت  $0/2$
- ضریب استروهمال  $0/2$

## ۴-۴- مدل سازی عددی آبشستگی با Fluent

مدل سازی در دو مرحله صورت گرفته است. در مرحله اول آبشستگی مورد بررسی قرار گرفته و در مرحله دوم مدل سازی برای سرعت سنجی، به صورت تک فازی و در زمان یک ساعت پس از شروع آبشستگی در بستر تثبیت شده انجام شده است.

در مرحله اول برای مدل سازی عددی آبشستگی ابتدا هندسه کانال مانند هندسه مدل فیزیکی طراحی و مش بندی شده و شرایط مرزی در آن تعریف شده است.

در مدل آزمایشگاهی عمق آبشستگی در ۱۷۱ نقطه در اطراف تکیه گاه اندازه گیری شده است. در شکل (۴-۱) پلن نقاط برداشت عمق آبشستگی نشان داده شده است. در مدل عددی فلوئنت نیز به همین ترتیب اندازه گیری ها صورت گرفته تا امکان مقایسه با مدل آزمایشگاهی وجود داشته باشد. با توجه به اینکه بیشترین عمق آبشستگی در گوشه بالادست تکیه گاه اتفاق می افتد تراکم نقاط برداشت عمق آبشستگی در این نقطه بیشتر است.



شکل (۴-۱) نقاطی که در آنها عمق آبشستگی اندازه گیری شده است

بعد از تعیین سرعت آستانه حرکت ذرات رسوب که معادل  $(28 \text{ cm/s})$  تعیین شد، آزمایش برای عدد فرود  $0/22$  صورت گرفت که معادل  $(26 \text{ cm/s})$  می‌باشد. با فرض اینکه حدود  $79$  درصد عمق آبشستگی در یک ساعت اول آزمایش اتفاق می‌افتد و بعد از آن میزان آبشستگی کاهش پیدا می‌کند و مقدار کمی بر عمق آبشستگی افزوده می‌شود مبنای محاسبات یک ساعت قرار گرفته است. در مدل عددی فلونت جریان آب با ورودی دبی  $40 \text{ L/s}$  به مدت یک ساعت در کانالی مشابه کانال مدل آزمایشگاهی مدل‌سازی شده است.

#### ۴-۴-۱- تعریف هندسه کانال و مش بندی برای آبشستگی

در مدل‌سازی عددی ابتدا باید هندسه کانال و فضاهای مورد بررسی تعریف شوند. با توجه به اینکه فلونت با روش المان محدود جریان را تحلیل می‌کند باید سلول‌های مورد تحلیل این نرم‌افزار تعریف شوند. نرم‌افزار فلونت قادر به این کار نیست و تعریف هندسه و مش بندی توسط نرم‌افزار پیش پردازنده گمبیت صورت می‌گیرد. به منظور تحلیل جریان توسط فلونت تعداد و اندازه سلول‌های مورد تحلیل متناسب با نیازهای مدل‌سازی تعریف شده‌اند. به عبارت دیگر با توجه به اینکه در این تحقیق، هدف اصلی ما تعیین میزان عمق آبشستگی و مقایسه آن با مدل آزمایشگاهی می‌باشد، هندسه کانال مانند هندسه مدل آزمایشگاهی تعریف شده است و مش بندی نیز متناسب با فضاهای مورد تحلیل، کوچک و بزرگ شده‌اند. البته با توجه به اینکه فلونت قابلیت تعریف جریان ورودی و خروجی به صورت توسعه یافته را دارد طول قسمت ابتدایی و انتهایی کانال کاهش یافته است. کانال طراحی شده در گمبیت به طول  $6/3$  می‌باشد که  $2$  متر ابتدای آن برای توسعه جریان می‌باشد و بعد از آن بستر رسوبی به طول  $2$  متر مانند بستر رسوبی مدل آزمایشگاهی است که تکیه‌گاه در فاصله  $60$  تا  $72$  سانتی‌متری از ابتدای بستر رسوبی قرار گرفته است و بعد از آن قسمت سوم کانال به طول  $2/3$  متر به منظور خروج یکنواخت جریان می‌باشد.

به منظور افزایش دقت در مدل‌سازی و همچنین کاهش زمان این کار مش‌های تعریف شده در قسمت‌های قبل از محل آبشستگی و بعد از آن با ابعاد بزرگ‌تر تعریف شده‌اند و مش‌های در محل آبشستگی و عمق رسوب که نیاز به دقت بیشتری در تحلیل دارند، ریزتر تعریف شده‌اند. به همین منظور مش‌بندی در سه بخش صورت گرفته است. قسمت اول کانال که قبل از محل آبشستگی می‌باشد و قسمت سوم کانال که بعد از محل آبشستگی می‌باشد، به منظور توسعه جریان طراحی شده است و فقط هدایت‌کننده جریان می‌باشند. ابعاد مش‌های این دو قسمت ۵cm تعریف شده‌اند. در قسمت دوم کانال که علاوه بر آب، رسوب هم وجود دارد و شامل تکیه‌گاه هم بوده و فرایند آبشستگی در این قسمت صورت می‌گیرد نیازمند به دقت بیشتری می‌باشد. مش‌های تعریف شده در قسمت دوم ۲ cm می‌باشد. ابعاد تعریف شده، ابعاد اضلاع سلول‌ها می‌باشند و خود سلول‌ها بر اساس موقعیت و شکل سلول می‌توانند ابعاد متفاوتی داشته باشند که گمبیت متناسب با اندازه اضلاع تعریف شده برای سلول‌ها و جایگاه آنها، ابعاد آنها را تعریف می‌کند.

توجه به این نکته مهم است که با توجه به سه بعدی بودن مدل‌سازی، ابعاد تعریف شده در این قسمت تأثیر زیادی در دقت و زمان آبشستگی دارند به طوری که اگر ابعاد آن بزرگ باشد نتایج حاصل شده از آن از دقت کافی برخوردار نیست و اگر بسیار ریز باشد تعداد سلول‌ها به شدت افزایش پیدا کرده و زمان تحلیل آن طولانی شده و نیازمند به سخت‌افزارهای توانمندتری در تحلیل مدل‌سازی به وجود می‌آید.

شکل مش بندی هم تأثیر زیادی در دقت تحلیل جریان دارد و باید بر اساس نیاز مدل تعریف شود. در این مدل‌سازی با توجه به اینکه تحلیل جریان و آبشستگی در سه جهت مورد نیاز است بهترین شکلی که برای سلول‌های مش بدست آمده است سلول‌های مثلثی می‌باشد. این شکل به این دلیل بهترین نتایج را داده که سلول‌های مثلثی دارای سطوح در جهات مختلفی می‌باشد در حالی که سطوح سلول‌ها مستطیلی فقط در سه جهت طولی، عرضی و ارتفاع می‌باشند که تحلیل دقیقی از آبشستگی به ما نمی‌دهند.

#### ۴-۴-۲- تعیین شرایط مرزی

بعد از تعریف هندسه کانال و مش بندی باید شرایط مرزی کانال تعریف شوند که در دو قسمت صورت می‌گیرد. یکی فضایی که سیال و نوع سیالی که در آن وجود دارد و دیگری تعریف محل ورود و خروج و دیواره‌ها می‌باشد. هرچند که فلوئنت قابلیت تعریف این قسمت و تغییر آنها را دارد اما توصیه می‌شود این کار نیز توسط نرم‌افزار انجام شود. در این تحقیق شرایط مرزی کانال تعریف شده شامل یک ورود آب به عرض ۱ متر و ارتفاع ۵cm می‌باشد که در قسمت ضلع ورودی و در بالای آن تعریف شده است. همچنین یک خروجی در ضلع خروجی با همین مشخصات تعریف شده است. سایر سطوح کانال به صورت دیواره تعریف شده‌اند. نوع سیال موجود در این فضا به دو صورت جامد و مایع تعریف شده است.

در پایان تعریف هندسه و مش بندی و تعیین شرایط مرزی باید فایل خروجی متناسب نرم‌افزار فلوئنت گرفته شود.

#### ۴-۴-۳- مدل آشفستگی در آبشستگی

در مدل عددی فلوئنت با توجه به اینکه یکی از فازها رسوب می‌باشد باید از مدل دو فازی اولرین استفاده شود. در این صورت امکان تعریف یکی از فازها به صورت ریزدانه به وجود می‌آید که در آن می‌توان خصوصیات رسوب و ضریب‌های مورد نیاز برای فرایند آبشستگی که شامل خصوصیات رسوب و ضرایب تراکنش بین رسوب و سیال است را تعریف کرد. این قسمت یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی عددی می‌باشد را مشخص کرد به طوری که عدم دقت در تعیین خصوصیات سیال و یا ضرایب تراکنش بین سیال و رسوب منجر به نتایج بسیار متفاوتی می‌شود.



## ۴-۴-۴- مراحل مدل سازی عددی در فلوئنت برای آبشستگی

در مدل سازی عددی باید تمامی اطلاعات مورد نیاز نرم افزار فلوئنت که شامل اطلاعات مدل آزمایشگاهی و اطلاعات تخمین زده می باشد وارد شود و مدل سازی بر اساس این اطلاعات انجام شود. مراحل انجام مدل سازی در فلوئنت به ترتیب زیر می باشد.

- ۱- وارد کردن فایل خروجی گمبیت در فلوئنت.
- ۲- کنترل فایل وارد شده که شامل هندسه، مش بندی و شرایط مرزی می باشد.
- ۳- تعیین نوع تحلیل به صورت ناپایدار و جریان سه بعدی
- ۴- تعیین نوع تحلیل و تعداد فازها که در آبشستگی اولرین و با دو فاز تعریف شده است.
- ۵- تعریف مدل ویسکوزیته که در این مدل به صورت  $k-\epsilon$  دو معادله ای و مدل RNG تعریف شده است.
- ۶- تعریف مواد که دو ماده آب و رسوب در آن تعریف می شود.
- ۷- تعیین فاز اول و دوم که آب به عنوان فاز اول و رسوب به عنوان فاز دوم تعریف می شود.
- ۸- تعیین ضرایب برخاستگی، لغزش و انتقال که معادل  $0.5$ ،  $0.3$  و  $0.3$  می باشد.
- ۹- تعیین شرایط شتاب جاذبه و جهت آن و همچنین شیب کانال
- ۱۰- تعیین شرایط مرزی که شامل تعیین دبی ورودی  $40 \text{ L/s}$  و زبری دیواره ها می باشد.
- ۱۱- اختصاص فضای مختص آب و رسوب
- ۱۲- تعیین طول و تعداد گام های تحلیل و تعداد تکرار تحلیل و اجرای آن

لازم است توجه شود که در مدل سازی برای آبشستگی پس از اتمام تحلیل فلوئنت برای زمان یک ساعت، دبی ورودی صفر می شود و دوباره با همین شرایط برای زمان ۵ دقیقه تحلیل توسط فلوئنت ادامه پیدا می کند. این کار به منظور تحلیل ته نشین شدن رسوب معلق در آب و تعیین دقیق تر سطح آبشستگی صورت می گیرد.

#### ۴-۴-۵- مراحل برداشت اطلاعات از فلوئنت

۱- تعریف سطح بین دو فاز با استفاده از تعریف سلول‌هایی که نیمی از حجم آن را رسوب اشغال کرده است. و با توجه به اینکه نسبت حجمی رسوب در حالت اشباع  $0/6$  می‌باشد، نسبت حجمی این سلول‌ها  $0/3$  تعریف شده است.

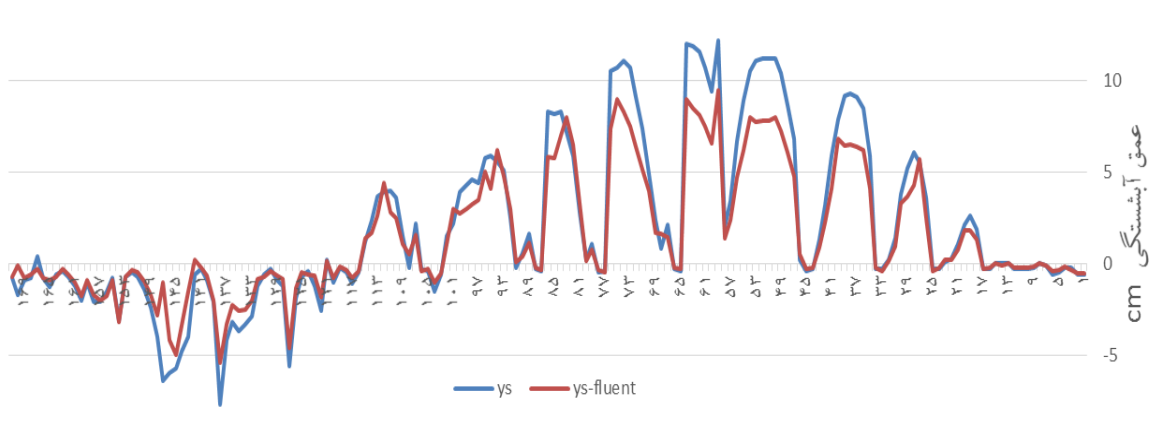
۲- گرفتن خروجی از نرم‌افزار که شامل طول و عرض و ارتفاع و سطح آبستگي که از مجموعه سلول‌های با نسبت حجمی  $0/3$  شکل گرفته است.

۳- برداشت مختصات نقاط مورد نیاز از این سطح که شامل ۱۷۱ نقطه می‌باشد.

۴- رسم نمودارها و تحلیل آنها

#### ۴-۴-۶- نتایج برداشت عمق آبستگي

در مدل‌سازی عددی با تعریف خصوصیات رسوب مشابه رسوب مدل آزمایشگاهی آبستگي به مدت ۱ ساعت انجام شده و عمق آبستگي از فلوئنت در ۱۷۱ نقطه منطبق بر نقاط اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی بدست آمده است. در شکل (۴-۲) نمودار عمق آبستگي در مدل عددی و آزمایشگاهی نشان داده شده است.



شکل (۴-۲) نمودار عمق آبستگي در ۱۷۱ نقطه در شرایط  $Fr = 0/22$

با توجه به اینکه بیشترین اندازه‌گیری‌ها در نقاط بحرانی آبشستگی صورت گرفته است در گوشه بالادست تکیه‌گاه که بیشترین عمق آبشستگی را دارد، نقاط اندازه‌گیری متراکم‌تر شده است. علت نوسانی بودن این نمودار این است که نقاط اندازه‌گیری شده در ردیف‌هایی در عرض جریان می‌باشد. در هر ردیف نقاطی که به دیواره شامل تکیه‌گاه نزدیکتر است، عمق آبشستگی بیشتر می‌باشد. همچنین روند کلی نمودار نشان می‌دهد که در ابتدای کانال آبشستگی کمی صورت گرفته و در میانه کانال بیشترین عمق آبشستگی اتفاق افتاده است و در انتهای کانال که عمق آبشستگی به صورت منفی نشان داده شده است بیانگر انباشت رسوب می‌باشد. در قسمت انتهایی کانال بستر رسوبی پس از یک ساعت از آبشستگی نسبت به بستر اولیه دارای ارتفاع شده است.

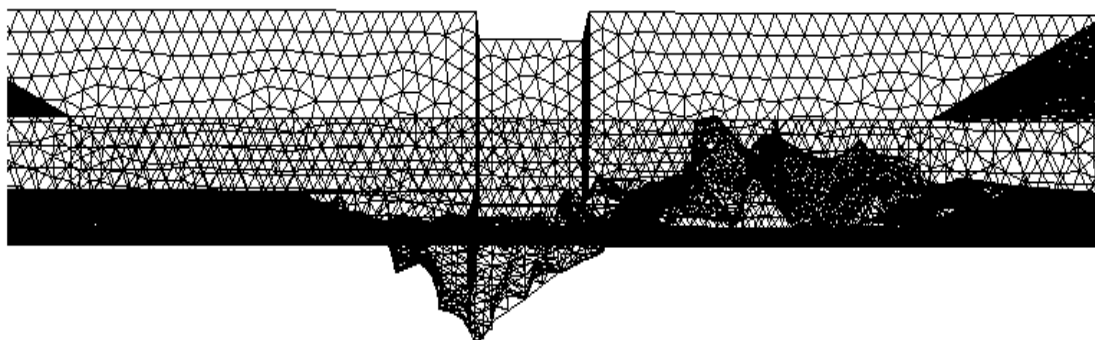
در این نمودار میانگین قدر مطلق خطای (MAE) مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی برابر  $cm$   $0/9$  بوده است. میانگین قدر مطلق خطا (MAE) بیانگر میانگین اختلاف دو عمق آبشستگی مدل آزمایشگاهی و مدل عددی فلونت در  $156$  نقطه می‌باشد. با توجه به میانگین عمق آبشستگی که برابر  $3/31$   $cm$  بوده است در صد خطا برابر  $27\%$  می‌باشد. باید توجه داشت که تعیین دقیق عمق آبشستگی در فلونت امکان‌پذیر نیست و هرچه مش تعیین شده در سطح جدا کننده بین دو فاز آب و رسوب ریزتر باشد عمق آبشستگی در فلونت دقیق‌تر مشخص می‌شود.

## ۴-۵- سرعت‌سنجی با مدل عددی فلونت

در مرحله دوم به منظور سرعت‌سنجی آب پس از آبشستگی با مدل‌سازی عددی ابتدا هندسه کانال بر اساس بستر تثبیت شده ۱ ساعت پس از آبشستگی در مدل آزمایشگاهی، در نرم‌افزار گمبیت طراحی و مش بندی شده و شرایط مرزی در آن تعریف شده است. برای مدل‌سازی عددی در فلونت شرایط جریان به صورت تک فاز (آب) تعیین شده و مدل‌سازی صورت گرفته است.

#### ۴-۵-۱- تعریف هندسه کانال و مش بندی برای سرعت سنجی

با توجه به اینکه هدف اصلی ما از این مدل سازی بررسی نحوه مدل سازی عددی می باشد یکی از قسمت هایی که حائز اهمیت می باشد مقایسه و تطبیق مدل عددی با مدل آزمایشگاهی می باشد. به همین منظور برای تعریف هندسه کانال و مش بندی برای تحلیل جریان و یافتن علل آبشستگی، لازم است تا از نتایج آزمایشگاهی برای مدل سازی جریان پس از آبشستگی استفاده شود. طراحی هندسه کانال و ابعاد آن برای سرعت سنجی مانند هندسه و ابعاد کانال در قسمت آبشستگی می باشد با این تفاوت که پس از آبشستگی بستر رسوبی تغییر کرده و در قسمت هایی آبشستگی صورت گرفته و در قسمت هایی انباشت رسوب شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از عمق آبشستگی در ۱۷۱ نقطه در مدل آزمایشگاهی عمق های بدست آمده ابتدا در گمبیت تعریف می شوند و تمامی نقاط با اتصال به یکدیگر یک سطح ناهمواری را تشکیل می دهند که همان بستر تثبیت شده با دوغاب سیمان در مدل آزمایشگاهی می باشد. در گمبیت تمام این سطوح به صورت دیواره تعریف می شوند. شکل (۳-۴) مش طراحی شده در گمبیت که بر اساس بستر تثبیت شده با دوغاب سیمان در مدل آزمایشگاهی می باشد، نشان داده شده است. در قسمت تعریف سیال نیز با توجه به اینکه در این قسمت از مدل سازی فقط سرعت جریان مورد بررسی قرار می گیرد جریان به صورت تک فازی تعریف می شود تمام فضای تعریف شده در گمبیت به آب اختصاص پیدا می کند. قسمت ورودی و خروجی و سایر شرایط همانند کانال تعریف شده برای آبشستگی می باشد.



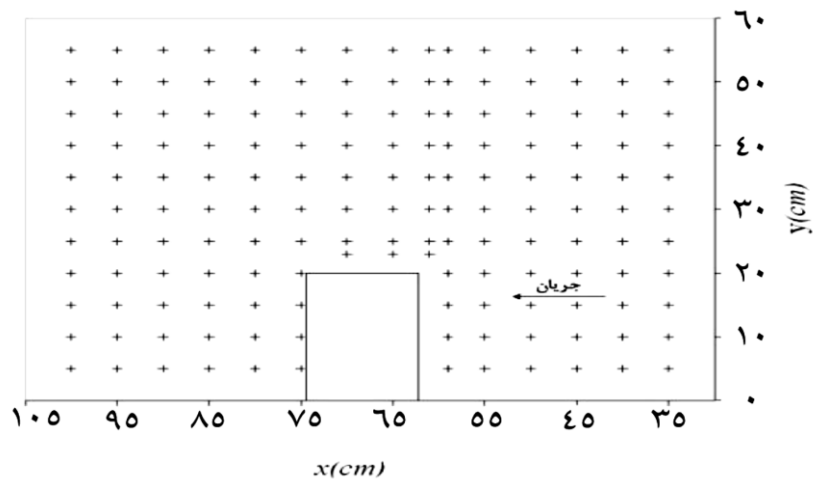
شکل (۳-۴) طراحی بستر تثبیت شده پس از آبشستگی در Gambit

#### ۴-۵-۲- مدل آشفتگی سرعت سنجی

برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب با توجه به تحقیقات صورت گرفته پیشین، مدل های  $K-\epsilon$  استاندارد،  $RNG K-\epsilon$ ،  $Realizable K-\epsilon$  و  $RSM$  که تاکنون نتایج قابل قبولی را در شبیه سازی جریان اطراف پایه های پل نشان داده اند مورد بررسی قرار گرفتند. از میان این مدل های آشفتگی، مدل  $RNG K-\epsilon$  به دلیل سرعت بالاتر در رسیدن به همگرایی و اقتصادی تر بودن مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل آزمایشگاهی سرعت سنجی در سه جهت طولی، عرضی و عمقی در ۱۵ ردیف در عرض کانال اندازه گیری شده است. با توجه به شکل (۴-۴) ۱۲ ردیف آن شامل ۱۱ نقطه در عرض کانال و در مقطع تکیه گاه سه ردیف در ۸ نقطه در عرض کانال در ارتفاع ۹ cm از بستر کانال اندازه گیری شده است که مجموع نقاط ۱۵۶ نقطه می باشد. در مدل عددی فلوئنت نیز به همین ترتیب اندازه گیری ها صورت گرفته تا قابلیت مقایسه با مدل آزمایشگاهی بهتر صورت بگیرد.

#### ۴-۵-۳- مراحل مدل سازی عددی در فلوئنت برای سرعت سنجی

در مدل سازی عددی باید تمامی اطلاعات مورد نیاز نرم افزار فلوئنت که شامل اطلاعات مدل آزمایشگاهی و اطلاعات تخمین زده می باشد وارد شود و مدل سازی بر اساس این اطلاعات انجام شود. در مرحله سرعت سنجی جریان در سه جهت طولی، عرضی و عمقی ۱۵۶ نقطه در فلوئنت محاسبه شده و با نتایج مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار می گیرد. در شکل (۴-۴) پلن نقاط محاسبه سرعت جریان در ۱۵۶ نقطه نشان داده شده است. این نقاط دقیقاً منطبق بر نقاط برداشت سرعت جریان در مدل آزمایشگاهی است.



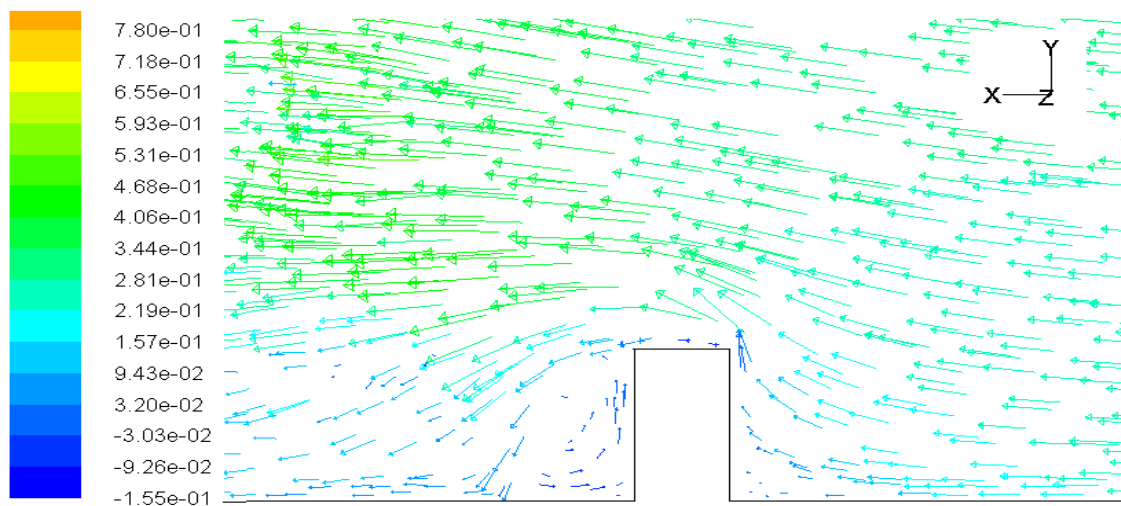
شکل (۴-۴) نقاط سرعت سنجی پیرامون یک تکیه‌گاه پل

مراحل انجام مدل‌سازی برای سرعت سنجی در فلوئنت به ترتیب زیر می‌باشد.

- ۱- وارد کردن فایل خروجی گمبیت در فلوئنت
- ۲- کنترل فایل وارد شده که شامل هندسه، مش بندی و شرایط مرزی می‌باشد.
- ۳- تعیین نوع تحلیل به صورت steady و جریان سه بعدی
- ۴- تعیین نوع تحلیل و تعداد فازها که در سرعت‌سنجی به صورت VOF و تک فاز می‌باشد.
- ۵- تعریف مدل ویسکوزیته که در این مدل به صورت k-ε دو معادله‌ای و مدل RNG تعریف شده است.
- ۶- تعریف مواد که ماده آب علاوه بر فاز هوا که پیش‌فرض فلوئنت است در آن تعریف شده.
- ۷- تعیین فاز اول و دوم که هوا به عنوان فاز اول و آب به عنوان فاز دوم تعریف شده.
- ۸- تعیین شرایط شتاب جاذبه و جهت آن و همچنین شیب کانال.
- ۹- تعیین شرایط مرزی که شامل تعیین دبی ورودی ۴۰ L/s و زبری دیواره‌ها می‌باشد.
- ۱۰- اختصاص فضای مختص آب و هوا که کل فضا به آب اختصاص داده شده.
- ۱۱- تعیین طول و تعداد گام‌های تحلیل و تعداد تکرار تحلیل و اجرای آن.

## مراحل برداشت اطلاعات از فلوئنت

- ۱- تعریف نقاط مورد نیاز برای برداشت سرعت در این نقاط
  - ۲- گرفتن خروجی سرعت جریان در سه جهت طولی، عرضی و عمقی و مختصات
  - ۳- برداشت سرعت‌های مورد نیاز از داده‌های خروجی فلوئنت در ۱۵۶ نقطه
  - ۴- رسم نمودارها و تحلیل آنها
- در شکل (۴-۵) سرعت افقی جریان در اطراف تکیه‌گاه در فلوئنت نشان داده شده است.

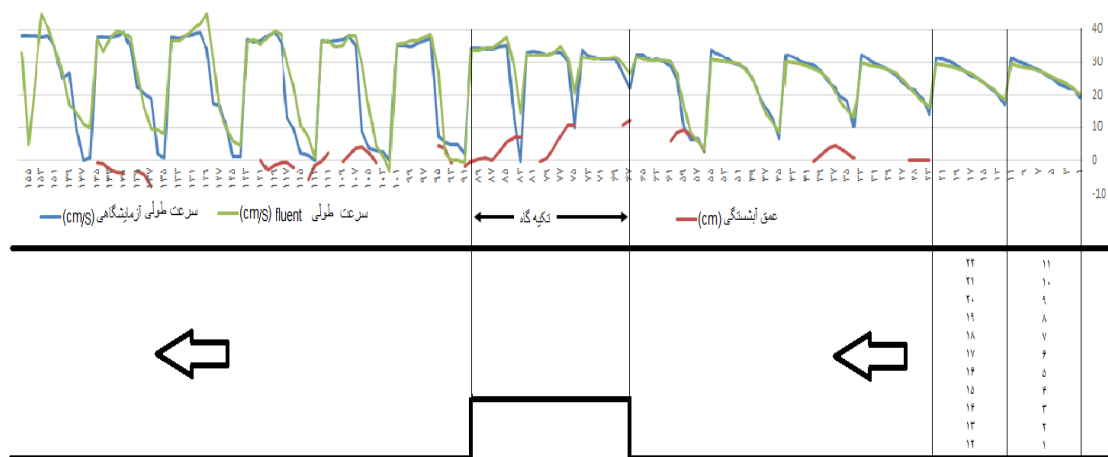


شکل (۴-۵) سرعت افقی جریان در اطراف تکیه‌گاه در بستر تثبیت شده ارتفاع ۹cm از بستر در فلوئنت

## ۴-۵-۴- نتایج سرعت طولی

سرعت طولی، سرعت در جهت جریان و در ارتفاع ۹ سانتیمتری از بستر کانال می‌باشد. این سرعت‌ها در ۱۵۶ نقطه در بستر تثبیت شده اندازه‌گیری شده و در نمودار مشخص شده است. به منظور مقایسه مدل عددی با مدل آزمایشگاهی همین نقاط در مدل عددی فلوئنت نیز اندازه‌گیری شده است که مقادیر اندازه‌گیری شده با فلوئنت به مقادیر آزمایشگاهی بسیار نزدیک است و فقط در قسمت انتهایی

به دلیل انباشته شدن رسوبات سرعت آزمایشگاهی و مدل عددی با هم تفاوت دارند. در شکل (۴-۶) نمودار سرعت طولی در ۱۵ ردیف که مجموع ۱۵۶ نقطه می باشد نشان داده شده است. علت نوسانی بودن نمودار مقایسه نقاط هر ردیف در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در یک دوره نوسان می باشد. یعنی هر دوره بیانگر نقاط یک ردیف می باشد.



شکل (۴-۶) نمودار سرعت طولی در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی Fluent  $MAE = ۲/۹۳$

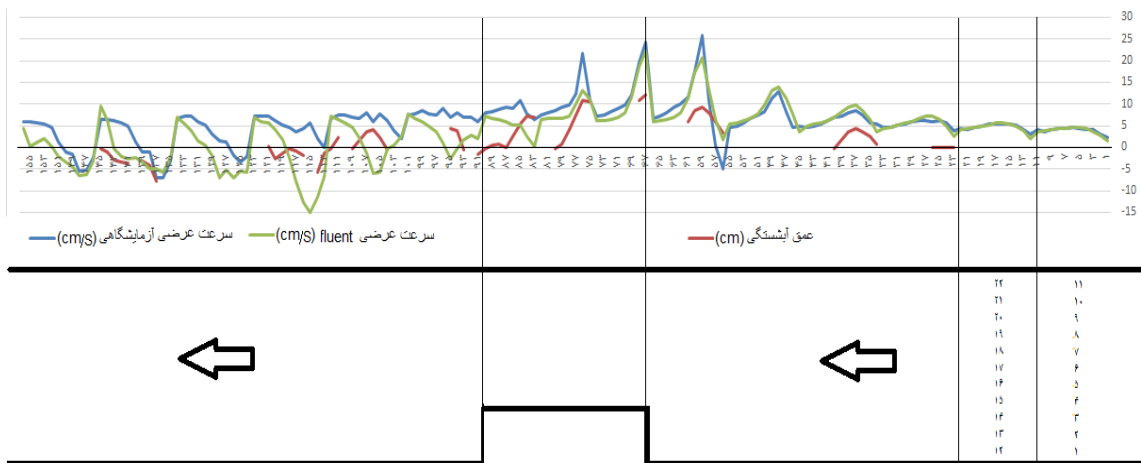
در سرعت طولی که مهم ترین سرعت می باشد میانگین قدر مطلق خطای (MAE) مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی برابر  $۲/۹۳ \text{ cm/s}$  می باشد. با توجه به میانگین سرعت طولی که برابر  $۲۴/۹۶ \text{ cm/s}$  می باشد، در صد خطا برابر  $۱۲\%$  می باشد. همچنین با در نظر گرفتن میانگین سرعت در جهت جریان که برابر  $۲۶/۹۵ \text{ cm/s}$  می باشد، میزان خطای کلی سرعت طولی برابر  $۱۱\%$  است.

در نمودار سرعت طولی، صعودی بودن نمودار در هر ردیف بیانگر افزایش سرعت طولی در عرض کانال از دیواره طرف تکیه گاه به سمت دیواره مقابل تکیه گاه می باشد. در مقطع تکیه گاه سرعت طولی در تمام عرض کانال تقریباً یکنواخت بوده و بیش از  $۳۰ \text{ cm/s}$  می باشد. با توجه به اینکه سرعت آستانه آبشستگی  $۲۸ \text{ cm/s}$  می باشد، می توان نتیجه گرفت که در مقطع تکیه گاه آبشستگی در تمام عرض کانال رخ می دهد.



#### ۴-۵-۵- نتایج سرعت عرضی

این سرعت عمود بر جهت جریان و در عرض کانال و در ارتفاع ۹ سانتیمتری از بستر کانال می‌باشد که بیانگر میزان انحراف خطوط جریان می‌باشد. این سرعت به میزان تنگ‌شدگی مقطع کانال توسط تکیه‌گاه بستگی دارد. در شکل (۲-۷) نمودار سرعت عرضی در ۱۵ ردیف که مجموع ۱۵۶ نقطه می‌باشد نشان داده شده است.



شکل (۴-۷) نمودار سرعت عرضی در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی Fluent MAE = ۲/۷۷

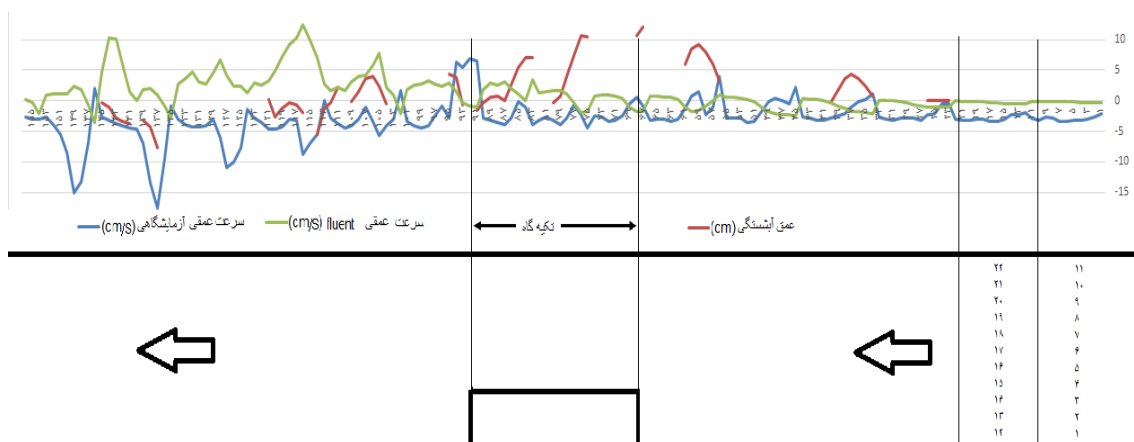
نمودار سرعت عرضی نشان می‌دهد در ابتدا آب با سرعت کمی از دیواره سمت تکیه‌گاه کانال به سمت دیواره مقابل در حرکت است. در نزدیکی تکیه‌گاه این سرعت افزایش پیدا می‌کند و تا انتهای تکیه‌گاه ادامه دارد. بعد از تکیه‌گاه جهت آن تغییر نموده و به سمت دیواره طرف تکیه‌گاه حرکت می‌کند. مقادیر اندازه‌گیری شده با فلونت به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک است و فقط در قسمت انتهایی به دلیل انباشته شدن رسوبات، سرعت آزمایشگاهی و مدل عددی با هم تفاوت دارند.

در سرعت عرضی میانگین قدر مطلق خطای مدل عددی (MAE) نسبت به مدل آزمایشگاهی برابر  $2/77 \text{ cm/s}$  می‌باشد. با توجه به اینکه میانگین سرعت عرضی برابر  $6/51$  می‌باشد میزان خطای فلونت

نسبت به مدل آزمایشگاهی برابر ۴۲٪ می‌باشد. همچنین با در نظر گرفتن میانگین سرعت در جهت جریان که برابر ۲۶/۹۵cm/s می‌باشد، میزان خطای کلی سرعت عرضی برابر ۱۰٪ است.

#### ۴-۵-۶- نتایج سرعت عمقی

این سرعت در جهت عمق جریان و در ارتفاع ۹ سانتیمتری از بستر کانال است. در شکل (۴-۸) نمودار سرعت عمقی نشان داده شده است. با توجه به اینکه اندازه سرعت عمقی نسبت به سرعت طولی و عرضی خیلی کمتر است نمی‌توان انتظار داشت که تشابه زیادی بین سرعت عمقی مدل عددی فلونت و مدل آزمایشگاهی وجود داشته باشد. همچنین در انتهای کانال به دلیل انباشته شدن رسوب، این اختلاف بیشتر هم می‌شود.



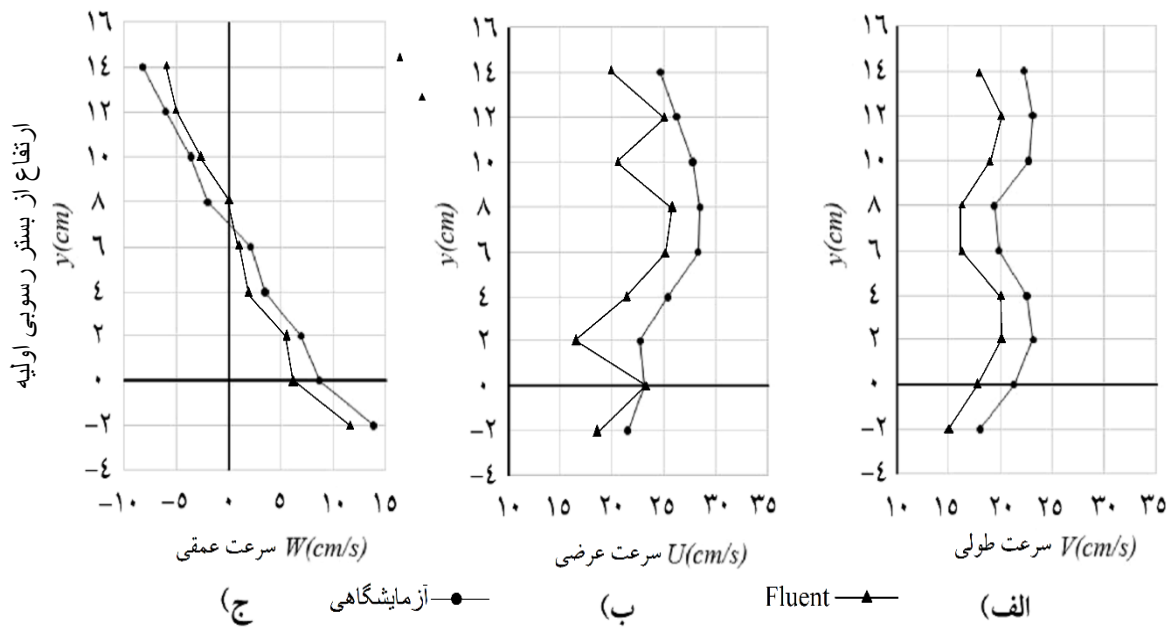
شکل (۴-۸) نمودار سرعت عمقی در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی Fluent  $MAE = 5/12$

در سرعت عمقی میانگین قدر مطلق خطای مدل عددی (MAE) نسبت به مدل آزمایشگاهی برابر ۵/۱۲cm/s می‌باشد. با توجه به اینکه میانگین سرعت عمقی برابر ۳/۵cm/s می‌باشد میزان خطای اندازه‌گیری شده با فلونت بیش از ۱۰۰٪ است که بیانگر خطای زیادی است. اما باید توجه داشت که

سرعت عمقی با سرعت طولی و سرعت عرضی همراه بوده و در عمل قابلیت تفکیک ندارد و نسبت به سرعت طولی و عرضی خیلی کمتر است. به همین دلیل این خطا قابل توجیه می‌باشد. در اصل برای بدست آوردن میزان خطا باید اختلاف سرعت عمقی در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی نسبت سرعت کلی جریان مقایسه شود. با در نظر گرفتن میانگین سرعت در جهت جریان که برابر  $26/95 \text{ cm/s}$  می‌باشد، میزان خطای کلی سرعت عمقی برابر  $19\%$  است. ضمناً باید توجه داشت که سرعت عمقی در ارتفاع  $9 \text{ cm}$  از بستر کانال تأثیر چندانی در آبشستگی ندارد.

#### ۴-۶- بررسی عمقی مؤلفه‌های سرعت در نقطه مبنا در فلوئنت

با توجه به این که در آزمایش‌ها، آبشستگی از نقطه مبنا (گوشه بالادست تکیه‌گاه) شروع شده و به تدریج بر عمق و حجم چاله آبشستگی در این نقطه افزوده شده است و همچنین بیشترین عمق آبشستگی در این نقطه ایجاد شده است، این نقطه اهمیت زیادی دارد و مؤلفه‌های سرعت در آن بررسی شده است. برای بررسی توزیع سرعت در این نقطه، مؤلفه‌های سه بعدی سرعت در اعماق مختلف از سطح آب تا نزدیک کف چاله آبشستگی اندازه‌گیری شدند. این اعماق از عمق  $2 \text{ cm}$  حفره آبشستگی در نقطه مبنا تا ارتفاع  $14 \text{ cm}$  نسبت به بستر اولیه رسوب می‌باشد. در مدل عددی نیز متناظر با همین نقاط سرعت‌ها بدست آمده و مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. سرعت طولی در شکل (۴-۹-الف)، سرعت عرضی در شکل (۴-۹-ب) و سرعت عمقی در شکل (۴-۹-ج) نشان داده شده است. در ادامه این سرعت‌ها با هم مقایسه و مورد تحلیل قرار گرفته است.



شکل (۴-۹) نمودار سرعت جریان در نقطه مبنا در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی فلوئنت

الف) سرعت طولی      ب) سرعت عرضی      ج) سرعت عمقی

$V$ ،  $U$  و  $W$  به ترتیب مؤلفه‌های طولی، عرضی و عمقی سرعت جریان و  $y$  عمق جریان می‌باشد.

در سرعت طولی نقطه مبنا میانگین قدر مطلق خطای مدل عددی (MAE) نسبت به مدل آزمایشگاهی برابر  $3/12$  cm/s می‌باشد. با توجه به اینکه میانگین سرعت طولی نقطه مبنا برابر  $21/3$  می‌باشد میزان خطای فلوئنت نسبت به مدل آزمایشگاهی برابر  $15\%$  می‌باشد. همچنین با در نظر گرفتن میانگین سرعت در جهت جریان در نقطه مبنا که برابر  $33/93$  cm/s می‌باشد، میزان خطای کلی سرعت طولی در نقطه مبنا برابر  $9\%$  است.

در سرعت عرضی نقطه مبنا میانگین قدر مطلق خطای مدل عددی (MAE) نسبت به مدل آزمایشگاهی برابر  $3/93$  cm/s می‌باشد. با توجه به اینکه میانگین سرعت طولی نقطه مبنا برابر  $25/3$  می‌باشد میزان خطای فلوئنت نسبت به مدل آزمایشگاهی برابر  $16\%$  می‌باشد. همچنین با در نظر گرفتن میانگین سرعت در جهت جریان در نقطه مبنا که برابر  $33/93$  cm/s می‌باشد، میزان خطای کلی سرعت عرضی در نقطه مبنا برابر  $12\%$  است.

در سرعت عمقی نقطه مبنا میانگین قدر مطلق خطای مدل عددی (MAE) نسبت به مدل آزمایشگاهی برابر  $1/81 \text{ cm/s}$  می‌باشد. با توجه به اینکه میانگین سرعت طولی نقطه مبنا برابر  $6/1$  می‌باشد میزان خطای فلونت نسبت به مدل آزمایشگاهی برابر  $29\%$  می‌باشد. همچنین با در نظر گرفتن میانگین سرعت در جهت جریان در نقطه مبنا که برابر  $33/93 \text{ cm/s}$  می‌باشد، میزان خطای کلی سرعت طولی در نقطه مبنا برابر  $5\%$  است.

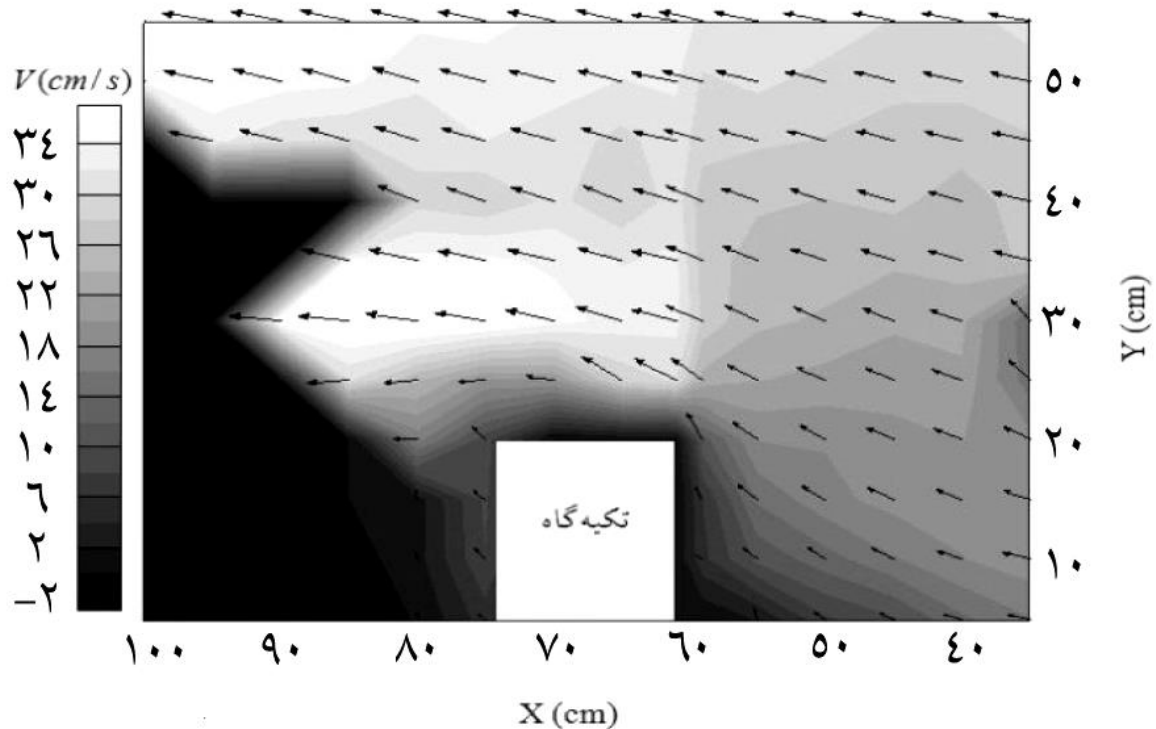
با توجه به شکل (۴-۹) کاملاً مشخص است که بیشترین مقدار سرعت در نقطه مبنا مربوط به سرعت عرضی می‌باشد که به حدود  $29$  سانتی‌متر بر ثانیه هم می‌رسد. البته این سرعت در کف کاهش یافته و به حدود  $22$  سانتی‌متر بر ثانیه می‌رسد. در خصوص سرعت عمقی نیز همان‌طور که ملاحظه می‌شود، از سطح آب تا عمق حدود  $7$  سانتی‌متری یک جریان رو به پایینی شکل می‌گیرد که به تدریج از میزان سرعت آن کاسته می‌شود و در عمق  $7$  سانتی‌متری مقدار سرعت صفر می‌شود و سپس جهت آن عوض شده و جریان رو به بالا شکل می‌گیرد. این نکته بیانگر وجود یک گرداب عمودی در نزدیک بستر در نقطه مبنا می‌باشد. این گرداب که در حقیقت بخشی از گرداب‌های اولیه شکل گرفته پیرامون تکیه‌گاه می‌باشد، باعث اعمال نیروی بالابرنده بر ذرات رسوب و جدا کردن آنها از گوشه بالادست تکیه‌گاه می‌شود. وجود گرداب عمودی در نقطه مبنا سبب شده که خطوط جریان در لایه‌های بالایی و پایینی جریان فشرده‌تر شوند. مطابق شکل (۴-۹-ج) جریان نزدیک سطح آب، رو به پایین حرکت کرده و در نزدیک بستر پس از برخورد به کف به سمت جهت جریان اصلی کانال منحرف می‌شود و به عبارتی گرداب اولیه شکل می‌گیرد. جریان رو به پایین و گرداب اولیه از عوامل اساسی شروع و توسعه آبستگی پیرامون تکیه‌گاه پل می‌باشد.

#### ۴-۷- بررسی الگوی جریان در نیم‌رخ‌های عمودی پیرامون تکیه‌گاه

در شکل (۴-۱۰) میدان جریان اطراف تکیه‌گاه از نمای بالا با استفاده از نرم‌افزار تک پلات ترسیم شده است. بردارها در حقیقت نشان دهنده خطوط جریان می‌باشند. مطابق راهنمای شکل، هرچه زمینه

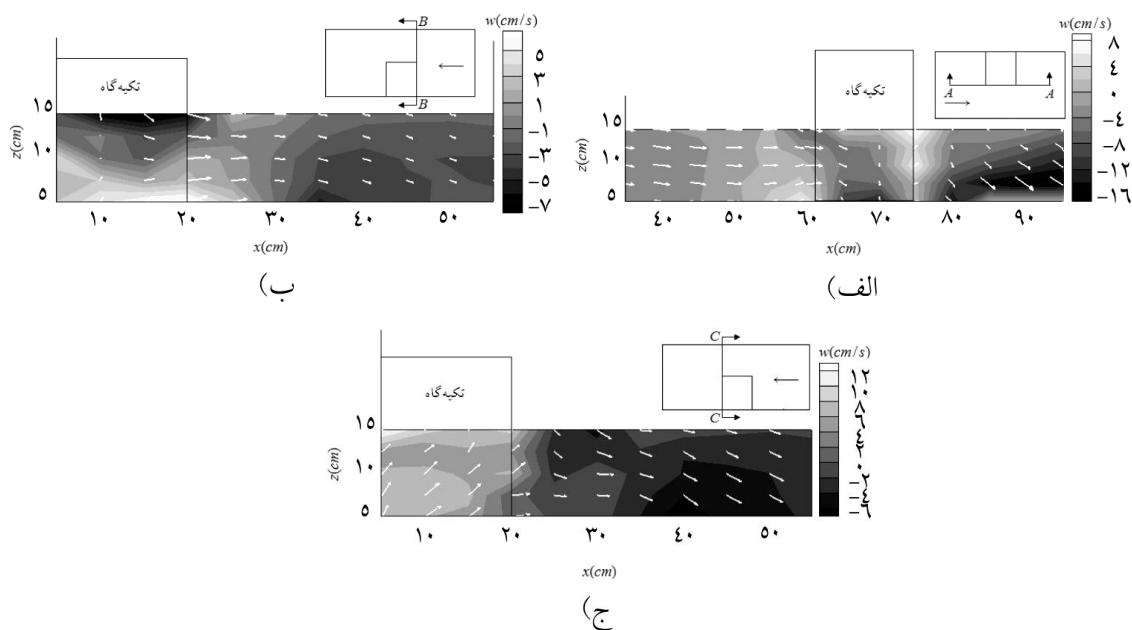
تصویر تیره‌تر شود نشان دهنده کاهش میزان سرعت می‌باشد که این وضعیت در پایین دست تکیه‌گاه اتفاق افتاده است. در این محدوده، سرعت کاملاً کاهش یافته و حتی میل به برگشت جریان برخلاف جهت جریان عمومی کانال نیز مشاهده می‌شود. همچنین در پایین دست تکیه‌گاه وجود تپه‌های رسوبی نهشته شده، الگوی جریان را به‌ویژه نزدیک بستر رسوبی تغییر داده است. در آزمایش‌های مرحله سوم مطابق شکل (۴-۱۰) جریان قبل از رسیدن به تکیه‌گاه به سمت محور کانال منحرف شده و در قسمت بالادست تکیه‌گاه یک منطقه کم سرعت شکل می‌گیرد که البته تا حد زیادی تحت تأثیر جداره کانال نیز می‌باشد. در گوشه بالادست تکیه‌گاه (نقطه مبنا) یک جریان پرسرعت عرضی شکل می‌گیرد. در منطقه پیشانی تکیه‌گاه نیز یک منطقه با جریان راکد شکل می‌گیرد که متأثر از دیواره تکیه‌گاه می‌باشد.

در قسمت پایین دست تکیه‌گاه نیز جریان برگشتی و گردابه‌های افقی مشاهده می‌شود.



شکل (۴-۱۰) میدان جریان اطراف تکیه‌گاه

همان گونه که قبلاً اشاره گردید، گردابه‌های افقی برخلاف گردابه‌های عمودی پتانسیل رسوب‌گذاری دارند و تأثیر به‌سزایی در شکل‌گیری تپه‌های رسوبی در بخش پایین دست تکیه‌گاه دارند. مطابق شکل (۴-۱۰)، سرعت طولی جریان هنگام رسیدن به تکیه‌گاه کاهش می‌یابد، طبق معادله انرژی، به دلیل این‌که رژیم جریان زیر بحرانی بوده و با اتمسفر در تماس می‌باشد، کاهش سرعت جریان با افزایش عمق جبران می‌شود. از آنجایی که سرعت از سطح آب به طرف کف کم می‌گردد، فشار دینامیکی روی قسمت جلوی تکیه‌گاه نیز از بالا به پایین کم می‌شود و گرادیان فشار ایجاد شده باعث ایجاد جریانی به طرف کف می‌شود. مکانیسم نام‌برده در شکل (۴-۱۱-الف) و شکل (۴-۱۱-ب) نشان داده شده است. این جریان رو به پایین، پس از برخورد با بستر، آن را حفر کرده و به جهات مختلف پراکنده می‌کند. مقداری از این جریان که رو به سمت بالادست بازگشت می‌کند در برخورد با جریان عمومی مجبور به حرکت در جهت جریان می‌شود. این چرخش جریان و بازگشت مجدد آن، باعث گرداب نعل اسبی (گرداب اولیه) می‌شود. به این ترتیب حرکت جریان رو به پایین، باعث ایجاد حفره‌ای در قسمت جلوی تکیه‌گاه می‌شود و با تشکیل این حفره، گرداب اولیه در آن تشکیل می‌شود. گرداب اولیه هم به سبب تنشی که به کف وارد می‌کند و هم اعمال نیروی بالابرنده (به خاطر مؤلفه سرعت رو به بالا) به ذرات کف، باعث جدا شدن ذرات از کف بستر می‌شود و آنها را در اختیار جریان عمومی آبراهه قرار داده تا به سمت پایین دست حمل شوند. در شکل (۴-۱۱-ب) الگوی جریان در نیم‌رخ (B-B) رسم شده است. در این نیم‌رخ وجود جریان رو به پایین و گرداب اولیه شکل گرفته در قسمت جلوی تکیه‌گاه مشخص می‌باشد. در شکل (۴-۱۱-ج) الگوی جریان در نیم‌رخ (C-C) رسم شده است.



شکل (۴-۱۱) میدان جریان اطراف تکیه‌گاه در نیم‌رخ الف) A-A ب) B-B ج) C-C

گرداب برخاستگی در شکل کاملاً نمایان است. مؤلفه‌های رو به بالای سرعت باعث کنده شدن ذرات از بستر می‌شوند. گرداب برخاستگی در حقیقت مانند یک گردباد عمل کرده که رسوبات را از سطح بستر مکیده و در اختیار جریان عمومی کانال قرار می‌دهد و این رسوبات در جایی که نیروی هیدرودینامیکی برای جابجایی آن‌ها غالب نباشند نهشته می‌شوند که معمولاً این اتفاق کمی پایین دست تکیه‌گاه و نزدیک دیواره کانال اتفاق می‌افتد.

#### ۴-۸- جمع‌بندی نتایج مدل‌سازی

جمع‌بندی نتایج مدل‌سازی به منظور بررسی میزان دقت مدل‌سازی عددی و میزان خطای نتایج مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی صورت می‌گیرد. این نتایج بیانگر میزان دقت مدل‌سازی عددی است. دقت مدل عددی شامل مجموعه‌ای از عوامل از جمله دقت نرم‌افزار Fluent، توانایی سخت‌افزاری پردازنده، دقت در انتخاب فاکتورهای مدل عددی و دقت در تعداد و شکل مش‌های طراحی شده می‌باشد. همچنین با توجه به ارتباط زیاد فاکتورهای مدل‌سازی در مدل عددی نوع انتخاب فاکتورها



توسط کاربر اهمیت زیادی پیدا می‌کند. این ارتباط و همبستگی بین فاکتورها آنقدر زیاد است که ممکن است با تغییر یکی از فاکتورها نتایج نهایی به طور کلی تغییر کند. البته با توجه به گسترده بودن قابلیت‌های نرم‌افزار فلوئنت فاکتورهای زیادی وجود دارند که تأثیر خاصی بر روی نتایج ندارند. همین موضوع اهمیت دقت در انتخاب فاکتورهای مورد نیاز مدل عددی مورد نظر را نشان می‌دهد. این نکته نیز حائز اهمیت است که روش حل مدل عددی فلوئنت، روش المان محدود می‌باشد و داده‌های هر المان را با تخمین به المان بعدی منتقل می‌کند. به همین دلیل نمی‌توان انتظار داشت در دو مدل‌سازی یکسان با داده‌های اولیه یکسان در مدل عددی فلوئنت؛ نتایج کاملاً یکسانی بدست آورد. هرچقدر میزان دقت تخمین مدل عددی فلوئنت در المان‌ها بیشتر باشد، دقت مدل‌سازی نیز بیشتر می‌شود. به همین دلیل است که شکل و تعداد مش‌های طراحی شده اهمیت زیادی در میزان دقت مدل‌سازی پیدا می‌کند.

جدول (۴-۱) جمع بندی نتایج مدل سازی عددی و مقایسه با مدل آزمایشگاهی

فاکتورهای اندازه‌گیری شده	میانگین قدر مطلق خطا (MAE)	میانگین قدر مطلق	در صد خطا	میانگین کلی	در صد خطای کلی
عمق آبشستگی	۰/۹	۳/۳۱	٪۲۷	۳/۳۱	٪۲۷
سرعت طولی	۲/۹۳	۲۴/۹۶	۱۲٪	۲۶/۹۵	٪۱۱
سرعت عرضی	۲/۷۷	۶/۵۱	٪۴۲	۲۶/۹۵	٪۱۰
سرعت عمقی	۵/۱۲	۳/۵	٪۱۰۰	۲۶/۹۵	٪۱۹
سرعت طولی نقطه مبنا	۳/۱۲	۲۱/۳	٪۱۵	۳۳/۹۳	٪۹
سرعت عرضی نقطه مبنا	۳/۹۳	۲۵/۳	٪۱۶	۳۳/۹۳	٪۱۲
سرعت عمقی نقطه مبنا	۱/۸۱	۶/۱	٪۲۹	۳۳/۹۳	٪۵

جمع بندی نتایج مدل سازی عددی فلوئنت در جدول (۴-۱) نشان داده شده است. این نتایج به ما نشان می دهد که میزان خطا در سرعت های طولی و عرضی کمتر از سرعت های عمقی می باشد. این بدان معنا می باشد که کمترین خطاها در سرعت هایی وجود دارد که اندازه آنها نزدیک به اندازه سرعت در جهت جریان باشد. در سرعت هایی که اندازه آنها نسبت به سرعت در جهت جریان خیلی کمتر باشد، میزان خطا خیلی زیاد است. اما میزان خطای آنها نسبت به سرعت در جهت جریان قابل قبول می باشد.

نکته ای که حائز اهمیت این است که در تفکیک سرعت ها به صورت جهتی (طولی، عرضی و عمقی) فقط در مواردی قابلیت مقایسه در مدل عددی و آزمایشگاهی را دارند که نزدیک به سرعت در جهت جریان باشند و سرعت هایی که مقدار آنها خیلی کمتر از سرعت اصلی جریان می باشد قابلیت مقایسه ندارند و شامل خطای زیادی می شوند. به عبارت دیگر در بین سرعت های جهتی سرعت هایی قابلیت مقایسه در مدل عددی و آزمایشگاهی را دارند که زاویه کوچک تری نسبت به سرعت اصلی جریان داشته باشند و سایر سرعت ها خطای زیادی را نشان می دهند. در صورتی که بخواهیم میزان دقت سرعت های جهتی با زاویه بزرگتر نسبت به سرعت اصلی را بررسی نماییم؛ باید میزان اختلاف آن سرعت ها در مدل عددی و مدل آزمایشگاهی، با سرعت کلی جریان مورد مقایسه قرار گیرد.

## فصل پنجم:

# نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۵-۱- نتایج

### ۵-۱-۱- نتایج آبشستگی

در این تحقیق مدل‌سازی عددی آبشستگی تکیه‌گاه به‌صورت سه بعدی انجام شده و نتایج حاصل از آن مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی عددی با فلوئنت نشان داد که فاکتورهای انتخاب شده و میزان تخمین آنها برای مدل‌سازی عددی با تقریب خوبی بدست آمده است به‌طوری که عمق آبشستگی بدست آمده با مدل عددی فلوئنت بسیار نزدیک به عمق آبشستگی در مدل آزمایشگاهی می‌باشد. اما با توجه به اینکه بسیاری از اطلاعات مدل آزمایشگاهی، از جمله سرعت آستانه حرکت در واسنجی مدل عددی بسیار مؤثر است؛ نمی‌توان از مدل عددی به‌صورت مستقل استفاده کرد اما کمک بسیار زیادی به تحلیل جریان و بررسی علل آبشستگی می‌کند.

### ۵-۱-۲- نتایج سرعت‌سنجی

پس از انجام آبشستگی بستر تثبیت شده توسط نرم‌افزار گمبیت طراحی و مدل‌سازی هیدرولیک جریان صورت گرفت. این مدل‌سازی با هدف بدست آوردن علل فرایند آبشستگی می‌باشد. با مقایسه نمودارهای سرعت در سه جهت طولی، عرضی و عمقی به این نتیجه می‌رسیم که مهم‌ترین عامل در ایجاد آبشستگی سرعت طولی می‌باشد. در واقع سرعت عرضی باعث هدایت جریان از دیواره طرف تکیه‌گاه به سمت دیواره مقابل آن قبل از تکیه‌گاه و برگرداندن جریان به سمت دیواره طرف تکیه‌گاه بعد از آن می‌باشد که این عامل باعث افزایش سرعت طولی جریان در مقطع تکیه‌گاه می‌شود و چون اولین مقطعی که سطح جریان کاهش پیدا می‌کند بالادست تکیه‌گاه می‌باشد و تمام جریان پشت تکیه‌گاه از گوشه بالادست تکیه‌گاه هدایت می‌شود، بیشترین سرعت در گوشه بالادست و در نتیجه بیشترین آبشستگی در این نقطه اتفاق می‌افتد. بعد از به تعادل رسیدن آبشستگی، کمبود سطح مقطع جریان در مقطع تکیه‌گاه توسط چاله آبشستگی جبران شده که باعث کم شدن سرعت طولی و ادامه نیافتن آبشستگی می‌شود.

## ۵-۲- پیشنهادات

### ۵-۲-۱- پیشنهادات مدل عددی Fluent

مدل سازی عددی یکی از راه های اجتناب ناپذیر برای تحلیل مسائل علمی از جمله آبشستگی می باشد. اما یکی از مهم ترین موضوعات در این زمینه انتخاب نرم افزار مناسب این کار می باشد. فلونت یک نرم افزار قدرتمند در زمینه تحلیل سیالات می باشد و به دلیل گسترده بودن دامنه تحلیل انواع سیالات، انتقال حرارت، جریان الکتریسیته و ... در فضای باز و در لوله شامل گزینه های بسیار زیادی می باشد. به همین دلیل پیشنهاد می شود از روش های مدل سازی عددی در کنار مدل آزمایشگاهی استفاده شود و قبل از انجام مدل سازی عددی با فلونت تمام جزئیات مورد نیاز و حدود آن مشخص شود.

### ۵-۲-۲- پیشنهاد در مورد آبشستگی

با تحلیل آبشستگی سرعت جریان، پیشنهاد های زیادی برای جلوگیری از آبشستگی از جمله استفاده از طوقه و ... ارائه شده است. با توجه به اینکه مقطع جریان در محل تکیه گاه کاهش می یابد و پس از آبشستگی و ایجاد حفره، آبشستگی متوقف می شود؛ روشی که در این تحقیق پیشنهاد می شود، افزایش مقطع جریان به صورت عمقی در محل تکیه گاه می باشد. به عبارت دیگر پیشنهاد می شود در زمان طراحی تکیه گاه حفره آبشستگی نیز طراحی گردد تا سرعت طولی در این مقطع افزایش پیدا نکند و جریان آب از لحاظ آبشستگی در حالت تعادل باشد.

## فهرست منابع (حروف الفبا)

- ۱- آریان فر ع، کرباسچی ا، شفاعی بجستان م، (۱۳۸۸) "بررسی تأثیر شکاف در پایه‌های پل بر میزان و توزیع تنش برشی در بستر جریان به کمک مدل عددی و شبکه عصبی"، مجموعه مقالات هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، ایران، ۲۰-۲۱ بهمن.
- ۱- ارونقی ه، فرسادیزاده د، حسین زاده دلیر ع، فاخری فرد ا، (۱۳۸۸)، "تعیین ابعاد مناسب طوق مستطیلی در کاهش آبشستگی پایه پل"، مجله دانش آب و خاک ۱۹(۱): ۵۱ تا ۶۴.
- ۲- بنی سلطان س، پیرزاده ب، کاویانپور م، (۱۳۸۹)، "مدل‌سازی عددی گزینه علاج بخشی دریاچه کشویی تخلیه کننده تحتانی سد شهید عباسپور با نرم‌افزار Fluent"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- ۳- خزیمه نژاد ح، قمشی م و شفاعی بجستان م، (۱۳۹۱)، "مقایسه عملکرد طوقه‌های مستطیلی متقارن و نامتقارن در کاهش آبشستگی موضعی تکیه‌گاه پل"، مجله علمی کشاورزی علوم و مهندسی آبیاری جلد ۳۷ شماره ۲ تابستان ۹۳.
- ۴- خزیمه نژاد ح، (۱۳۹۱)، "آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل‌ها و روش‌های کنترل آن"، مجله علمی کشاورزی، جلد ۳۷، شماره ۲، تابستان ۹۳.
- ۵- خزیمه نژاد ح، قمشی م، شفاعی بجستان م، رضانی ی، (۱۳۹۲)، "بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و آبشستگی پیرامون تکیه‌گاه پل با مقطع مستطیلی"، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۲، شماره اول، ۱۳۹۴.
- ۶- زارع دهدشت ا، حسونی زاده ه، محمودیان شوشتری م، (۱۳۸۹)، "بررسی پدیده آبشستگی اطراف پایه‌های پل، توسط مدل عددی Fluent"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران آبان ماه ۱۳۸۹، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۷- علیزاده و، صانعی م و اژدری مقدم م، (۱۳۹۰)، "استفاده از باله مدفون برای کنترل آبشستگی تکیه‌گاه پل"، دهمین کنفرانس بین‌المللی هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان.

۸- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، (۱۳۸۴)، "دستورالعمل مطالعات هیدرولیکی و آبشستگی پل"، نشریه شماره ۳۰۲.

۹- ساغروانی س، اظهري ا، عليزاده م، محمد نژاد ب، شريفی منش ح، (۱۳۸۹)، "مدل‌سازی عددی آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه پل با مقطع دایره‌ای"، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران آبان ماه ۱۳۸۹، دانشگاه تربیت مدرس.

۱۰- محبوب ب، محمدنژاد ب، بهمنش ج، (۱۳۹۲)، "مدل‌سازی عددی آبشستگی موضعی اطراف گروه پایه پل و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی"، نشریه آب و خاک جلد ۲۸، شماره ۲، خرداد - تیر ۱۳۹۳.

۱۱- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی جمهوری اسلامی ایران، (۱۳۹۰)، "راهنمای روش‌های محاسبه آبشستگی موضعی"، نشریه شماره ۵۴۹.

12- Abdul Karim Barbhuiya and Subhasish Dey, (2004), "Local scour at abutments: A review", Department of Applied Mechanics, National Institute of Technology, Silchar 788 010, India.

13- Breusers. H. N. C, (1966), "Time scale of two dimensional local scour", Proc of symposium on model and prototype conformity: Hydraulic research Laboratory, Poona.

14- Breusers. H. N. C., Nicollet. G, and Shen. H. W, (1977), "Local scour around cylindrical piers", J. Hydro.Res., (Delft), 15:211–252.

15- Cardoso AH, Bettess R, (1999), "Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments", J Hyd Engr ASCE.125: 388–399.

16- Day S, and Barbhuiya A, (2004), "Clear-water scour at abutments in thinly armored beds", J of Hydraulic Engineering, Am. Soc. Civ. Eng. 130: 622-634. 12

17- Dietz. J. W, (1969), "Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlmaterialien bei stromendem Abflub", Mitteilungen, Heft 155, Universitat fridericiana Karlsruhe.

18- Dongol, D. M. S. (1994), "Local scour at bridge abutments", Report No, 544, University of Auckland, School of T, Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag, Auckland, New Zealand.

- 19- Field, W.G. (1971), "Flood protection at highway bridge openings", University of Newcastle, N.S.W. Engineering Bulletin CE3.
- 20- Graf W H, (1996), "Fluvial Hydraulics, John Wiley & Sons press, New York.
- 21- Hoffmans, G.J.C.M. and Verheij, H.J , (1997), "Scour manual", A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 205pp.
- 22- Inglis, C.C. (1949), "The behavior and control of rivers and canals", Research Publication. No. 13. Parts I and II, Central Waterpower Irrigation and Navigation Research Station, Poona, India.
- 23- Kandasamy, J. K, (1989), "Abutment scour", Rep. No. 458, School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- 24- Kayaturk, S.Y, (2005), "Scour and scour protection at bridge abutment", Ph.D. Thesis, Middle East Technical University. 239p.
- 25- Kothyari, U.C., and Ranga Raju, K.G, (2001), "Scour Around Spur Dikes and Bridge Abutment", J. Hydr. Res. 39: 4. 367-374.
- 26- Kwan, F., (1984), "Study of abutment scour", Report No. 328, University of Auckland, School of T. Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag, Auckland, New Zealand.
- 27- Kwan, F, (1988), "Study of abutment scour", Report No. 451, University of Auckland, School of T. Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag, Auckland, New Zealand.
- 28- Kwan, T.F. and Melville, B.W, (1994), "Local scour and flow measurements at bridge abutments" J. Hydraul. Res., ASCE, Vol.32, No.5, PP.661-673.
- 29- Laursen, E. M. and Toch, A, (1956), "Scour around bridge piers and abutments", Bull. No. 4, Iowa Highway Res. Board.
- 30- Liu H K, Chang F M and Skinner M M, (1961), "Effect of bridge construction on scour and backwater", CER60 HKL 22, Colorado State University, Civil Engineering Section, Fort Collins, Colorado.
- 31- Li, H., Kuhnle, R.A. and Barkdoll, B.D, (2006), "Countermeasures Against Scour At Abutments", Report No. 49, USDA Agricultural Research Service.
- 32- Melville B.W, (1992), "Local scour at Bridge Abutments", J. of Hydraulic Engineering., 118:4. 615-631.
- 33- Melville, B.W, (1997), "Pier and abutment scour: integrated approach", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(2), 125-136.



- 34- Melville Bruce, (2008), “The Physics of local scour at Bridge Piers”, Fourth International Conference on Scour and Erosion 2008.
- 35- Neill CR, (1968), “Note on initial movement of coarse uniform bed material”, Journal of Hydraulic Research IHAR 6: 137-176.
- 36- Pezhman Taherei Ghazvinei, Junaidah Ariffin, Jazuri Abdullah and Thamer Ahmed Mohamed. (2014), “ Assessment of Local Scour at Bridges Abutment”, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 8(3): 296-304, 2014.
- 37- Qiping Yang, (2005), “Numerical Investigations of Scale Effects on Local Scour around a Bridge Pier”, The Florida State University DigiNole Commons.
- 38- Rajaratnam, N., and Nwachukwu, B.A, (1983) a, “Flow near groin-like structures”, J. Hydr. Engin. ASCE. 109: 3. 463-480.
- 39- Shatirah Akib, Hossein Bassar, Hojat Karami, Afshin Jahangirzadeh, (2014), “Retrofitting of Bridge Piers against the Scour Damages: Case Study of the Marand-Soofian Route Bridge”, International Journal of Civil, Architectural Science and Engineering Vol:8 No:1, 2014.
- 40- Shatirah Akib and Sadia Rahman, (2013), “Time Development of Local Scour around Semi Integral Bridge Piers and Piles in Malaysia”, International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering Vol:7 No:7, 2013.
- 41- Shatirah Akib\*, Afshin Jahangirzadeh, Hossein Bassar, (2014), “Local scour around complex pier groups and combined piles at semi-integral bridge”, J. Hydrol. Hydromech., 62, 2014, 2, 108–116.
- 42- Tey, C. B,(1984), “Local scour at bridge abutments”, Report No. 329, University of Auckland, School of T. Engineering, Department of Civil Engineering Private Bag, Auckland, New Zealand.
- 43- Vaghefi, M., GHodsiyan, M., and Salehi Neyshabouri, S.A, (2010), “Laboratory investigations of froud number on scour pattern around T eppi on 90 degree bend”, The 8th. International congress of civil eng. Shiraz University.
- 44- Wong, W. H, (1982), “Scour at bridge abutments”, Report No. 275, Department of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- 45- Zanke, U, (1978)b, “Zusammenhänge zwischen Strömung und Sedimenttransport” , Teil 2: “Berechnung des Sedimenttransportes hinter

befestigten Sohlenstrecken,-Sonderfall zweidimensionaler Kolk”, Mitteilungen des Franzius Instituts, TU-Hannover, Heft 48.

## **Abstract**

One of the most important factors in the destruction of bridges on rivers is the pier and abutment scour. One of the methods to assess the scour abutment of bridge is laboratory testing. But today researchers have great attention to numerical modeling due to limitations of laboratory work. In this study, the experimental data of Khozaymenejad et al. (2012) was used for fluent numerical modeling. In the experimental model, after 1 hour the flow velocity at 9 cm height from the bottom at 156 point was measured using electromagnetic velocity-meter. For modeling, firstly the mesh of the geometry of the fixed bed after 1 hour after the start of scouring, created by Gambit software and then the flow velocity calculated with Fluent software and they compared with the experimental results. Results of study showed that same to experimental model the maximum of scour occurred at the upstream corner of the abutment. The Mean absolute error (MAE) between the result of the numerical model and laboratory models was 0.9 cm. With respect to the scour depth which was 3.31 cm, the error is 27%. Comparison showed that the velocity calculated by the Fluent model with little approximation is equal to measured velocity. Also, the most important factor for creating scour is the horizontal velocity in the flow direction which caused by decreasing flow area due to contraction of abutment. Also results of this study indicated that the average value of the longitudinal velocity was equal to 24.96 cm/s. The mean absolute error (MAE) and the percentage of errors between experimental and numerical results were 2.93 cm and 12%, respectively.

Keywords: scour, abutment, Fluent, experimental model, numerical model



**Shahrood University of Technology**

**Faculty Agriculture**

**MSC Thesis in water structures**

**Modeling of the scour of bridge abutments  
using numerical model**

**By: Mojtaba Mirza Nabikhani**

**Supervisors:**

**Samad Emamgholizadeh**

**Khalil Azhdary**

**Adviser:**

**Hosein Khozeime Nezhad**

**september 2016**