



دانشکده کشاورزی

گروه مهندسی آب

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته سازه‌های آبی

عنوان

بررسی عددی مخزن هوای تحت فشار در تعدیل

فشارهای ناشی از پدیده ضربه قوچ

استادان راهنما

دکتر علی حسین‌زاده دلیر

دکتر فرزین سلماسی

استاد مشاور

دکتر اکرم عباسپور

پژوهشگر

مجتبی رحیمی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

نام خانوادگی : رحیمی

نام : مجتبی

عنوان پایان نامه : بررسی عددی مخزن هوای تحت فشار در تعدیل فشارهای ناشی از پدیده ضربه قوچ

استادان راهنما : دکتر فرزین سلماسی، دکتر علی حسین زاده دلیر

استاد مشاور : دکتر اکرم عباسپور

مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد رشته : مهندسی آب گرایش : سازه‌های آبی

دانشگاه : تبریز دانشکده : کشاورزی

تاریخ فارغ التحصیلی : شهریور ۹۰ تعداد صفحات : ۱۱۷

واژه‌های کلیدی : جریان غیر ماندگار، ضربه قوچ، مخزن هوای تحت فشار، نرم افزار Hammer.

چکیده :

جریان غیر ماندگار جریانی است که خصوصیات سیال در هر نقطه‌ی آن با زمان تغییر کند. معروف‌ترین و مخرب‌ترین حالت جریان غیر ماندگار در لوله‌ها چکش آبی یا ضربه قوچ است. این پدیده در لوله‌های تحت فشار و در اثر تغییر ناگهانی شرایط مرزی مانند باز و بسته شدن سریع دریچه‌ها یا شیرفلکه، قطع و وصل ناگهانی پمپ یا توربین، ترکیدن یک لوله و نظایر آن ایجاد می‌گردد. ایجاد جریان غیر ماندگار در خطوط لوله یا شبکه‌های توزیع آب، می‌تواند به افزایش یا کاهش قابل توجه فشار منجر شود. این تولید فشار در سیستم ممکن است به پمپ‌ها، شیرها و دیگر ضمام آسیب برساند. در این تحقیق مشخصات قسمتی از خط لوله انتقال آب از زرینه رود به شهرستان تبریز به طول ۱۱/۳ کیلومتر اخذ و تحلیل جریان غیر ماندگار توسط Hammer انجام شده است. این نرم افزار با استفاده از تکنیک خطوط مشخصه، معادلات مومتم و پیوستگی را حل کرده و این امکان را فراهم می‌سازد تا کاربر بتواند مراحل مختلف شکل گیری ضربه قوچ، چگونگی وقوع آن هم به صورت انیمیشن و هم به صورت گراف مشاهده نموده و خروجی مورد نظر خود را دریافت و چاپ نماید. نتایج نشان می‌دهد که بدون استفاده از تجهیزات ایمنی در خط لوله، بر اثر از کار افتادن پمپ‌ها، فشار- مثبت تا حد ۴۲۰/۸ متر در خط لوله به وجود خواهد آمد که موجب ترکیدن لوله خواهد شد. همچنین در سراسر خط لوله خط گرادیان هیدرولیکی زیر پروفیل لوله قرار می‌گیرد که این امر موجب کاویتاسیون و جدایی ستون مایع می‌گردد. با نصب تجهیزاتی مانند مخزن هوای تحت فشار و چرخ لنگر مشکلات فوق‌الذکر رفع شده و سیستم با ایمنی بیشتری کار خواهد نمود. استفاده از مخزن هوای تحت فشار با حجم ۷۵ متر مکعب و چرخ لنگر با اینرسی ۱۶۵ نیوتن بر متر مربع می‌تواند گزینه مناسبی برای مهار فشارهای مثبت و منفی ناشی از ضربه قوچ باشد.

تقدیم به

پدر ، مادر

برادر و خواهران عزیزم

حال که با لطف و عنایت پروردگار کار تدوین این پایان‌نامه به اتمام رسیده است بر خود لازم می‌دانم از اساتید راهنمای خود جناب آقای دکتر فرزین سلماسی و جناب آقای دکتر علی حسین‌زاده دلیر که در تمام مراحل انجام این پروژه همچون پدری دلسوز مرا مورد لطف، عنایت و راهنمایی خویش قرار دادند، خاضعانه تشکر کنم. از استاد مشاور این پایان‌نامه سرکار خانم دکتر عباسپور به پاس زحماتی که متحمل شده‌اند بسیار سپاسگزارم. از جناب آقای دکتر داود فرسادی زاده که زحمت داوری این پایان‌نامه را به عهده گرفتند صمیمانه قدردانی می‌کنم. در نهایت از دوستان عزیزم و همه کسانی که در نگارش این پایان‌نامه مدیون آن‌ها می‌باشم کمال تشکر را دارم.

مجتبی رحیمی

شهریور ۱۳۹۰

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و بررسی منابع

۲	۱-۱- مقدمه .....
۴	۲-۱- بررسی منابع .....
۱۴	۳-۱- استخراج معادلات حاکم بر پدیده ضربه قوچ .....
۱۷	۴-۱- نظریه‌های بررسی ضربه قوچ .....
۱۷	۱-۴-۱- نظریه رفتار صلب ستون آب .....
۱۸	۲-۴-۱- نظریه رفتار الاستیک .....
۲۱	۵-۱- حل عددی به روش خطوط مشخصه .....
۲۳	۶-۱- چگونگی ایجاد ضربه قوچ در خط رانش پمپ .....
۲۶	۷-۱- بررسی کلیه عوامل ضربه قوچ در ایستگاه‌های پمپاژ .....
۲۶	۱-۷-۱- بسته شدن سریع شیرهای قطع و وصل .....
۲۶	۲-۷-۱- از کار افتادن ناگهانی پمپ .....
۲۷	۳-۷-۱- پر کردن غیراصولی خط لوله .....
۲۷	۴-۷-۱- استفاده از شیرهای یک طرفه نامناسب .....
۲۸	۸-۱- تأثیر هوا، گازهای محلول و جدایی ستون آب در ضربه قوچ .....
۳۰	۹-۱- تغییر قطر و جنس لوله در ضربه قوچ .....
۳۰	۱۰-۱- تأثیر انشعاب در ضربه قوچ .....
۳۱	۱۱-۱- پیامدهای ناشی از جریان غیر ماندگار .....
۳۱	۱-۱۱-۱- فشارهای کم و زیاد .....
۳۲	۲-۱۱-۱- ارتعاشات .....
۳۲	۳-۱۱-۱- خلاء زایی .....
۳۳	۱۲-۱- تأثیر فشار پمپ در ضربه قوچ .....

۳۴	.....۱-۱۳- منحنی مشخصه پمپ و ضربه قوچ.....
۳۵	.....۱-۱۴- ضربه قوچ در خطوط تحت فشار ثقلی.....
۳۶	.....۱-۱۵- کنترل ضربه قوچ با تمهیدات اولیه در طراحی.....
۳۶	.....۱-۱۶- کنترل ضربه قوچ با رعایت اصول حفاظتی.....
۳۶	.....۱-۱۶-۱- تغذیه سامانه انتقال.....
۳۷	.....۱-۱۶-۲- تخلیه سیال از سامانه انتقال.....
۳۷	.....۱-۱۶-۳- تقسیم امواج فشار ضربه قوچ.....
۳۸	.....۱-۱۶-۴- تنظیم زمان توقف و راه اندازی سامانه انتقال.....
۳۸	.....۱-۱۷- تجهیزات کنترل کننده ضربه قوچ.....
۳۹	.....۱-۱۸- وسایل کنترل فشار ضربه قوچ در ایستگاه‌های پمپاژ.....
۳۹	.....۱-۱۸-۱- چرخ لنگر.....
۴۱	.....۱-۱۸-۲- لوله‌های کنار گذر.....
۴۲	.....۳-۱-۱۸- مخزن هوای تحت فشار.....
۴۴	.....۱-۱۹- وسایل کنترل فشار ضربه قوچ در خطوط لوله.....
۴۴	.....۱-۱۹-۱- شیرهای هوا.....
۴۴	.....۱-۱۹-۲- شیرهای تخلیه هوا.....
۴۵	.....۱-۱۹-۳- شیرهای هوا- خلاء.....
۴۶	.....۱-۱۹-۴- شیر ترکیبی هوا.....
۴۷	.....۱-۱۹-۵- شیرهای ایمنی.....
۴۷	.....۱-۱۹-۵-۱- شیرهای ایمنی فشار.....
۴۷	.....۱-۱۹-۵-۲- شیرهای اطمینان.....
۴۷	.....۱-۱۹-۵-۳- شیر اطمینان فشار.....
۴۸	.....۱-۱۹-۶- دودکش خط لوله.....

۴۹	..... مخازن موج گیر ۷-۱۹-۱
۵۰	..... مخزن تغذیه ۱-۷-۱۹-۱
۵۰	..... مخزن موج گیر ۲-۷-۱۹-۱
۵۱	..... محل قرارگیری و نصب مخازن موج گیر ۲۰-۱
۵۲	..... نحوه اتصال مخزن تغذیه به خط لوله ۲۱-۱
۵۳	..... نحوه اتصال مخزن موج گیر به خط لوله ۲۲-۱
۵۳	..... محل قرارگیری و نصب مخازن موج گیر ۲۳-۱

### فصل دوم: مواد و روش ها

۵۶	..... مقدمه ۱-۲
۵۸	..... معرفی و کاربرد نرم افزار Water Gems ۲-۲
۵۹	..... معرفی و کاربرد نرم افزار Hammer ۳-۲
۶۰	..... توانمندی ها و ابزارهای Hammer ۴-۲
۶۲	..... تعیین سرعت موج فشاری ۵-۲
۶۴	..... تعیین مدت زمان تحلیل در نرم افزار Hammer ۶-۲
۶۵	..... محاسبه زمان تحلیل در پروژه مورد بررسی ۱-۶-۲
۶۶	..... روش های محاسباتی افت انرژی در نرم افزار Hammer ۷-۲
۶۷	..... روش های محاسبه اصطکاک جریان ماندگار ۱-۷-۲
۶۸	..... اصطکاک جریان شبه ماندگار ۲-۷-۲
۶۸	..... روش های محاسبه اصطکاک جریان غیر ماندگار ۳-۷-۲
۶۹	..... روش های محاسباتی در Hammer ۸-۲
۷۰	..... روش های شبیه سازی در Hammer ۹-۲
۷۰	..... تئوری ستون صلب ۱-۹-۲
۷۱	..... شبیه سازی الاستیک ۲-۹-۲



۷۲	۱۰-۲- مشخصات فنی پمپهای خط انتقال مورد بررسی.....
۷۴	۱۱-۲- اطلاعات مهم پمپ در نرم افزار Hammer.....
۷۶	۱۲-۲- روش مورد استفاده برای طراحی شیرهای هوا.....
۷۹	۱۳-۲- تعیین مشخصات فنی مخازن هوای تحت فشار.....
۸۱	۱-۱۳-۲- محل قرارگیری و نحوه نصب مخزن هوای تحت فشار.....
۸۲	۲-۱۳-۲- محاسبه قطر لوله‌های ارتباطی مخزن هوای تحت فشار.....
۸۲	۳-۱۳-۲- محاسبه قطر لوله خروجی از مخزن ضربه گیر تحت فشار.....
۸۳	۴-۱۳-۲- محاسبه قطر لوله کنار گذر.....
۸۴	۱۴-۲- تعیین مشخصات فنی مخازن موج گیر روباز.....
<b>فصل سوم: نتایج و بحث</b>	
۸۶	۱-۳- مقدمه.....
۸۶	۲-۳- نتایج حاصل از نرم افزار Water Gems.....
۸۹	۳-۳- نتایج حاصل از نرم افزار Hammer.....
۹۳	۴-۳- نتایج حاصل از اضافه کردن شیرهای هوا.....
۹۷	۵-۳- نتایج حاصل از اضافه کردن مخزن هوای تحت فشار.....
۱۰۷	۵-۳- نتایج حاصل از اضافه کردن مخزن موج گیر.....
۱۱۰	۶-۳- نتیجه گیری کلی.....
۱۱۱	۷-۳- پیشنهادات.....
۱۱۳	منابع مورد استفاده.....

- شکل (۱-۱): نیروهای وارد بر یک المان لوله به طول  $\delta x$  ..... ۱۴
- شکل (۲-۱): حجم کنترل برای بدست آوردن معادله پیوستگی ..... ۱۹
- شکل (۳-۱): خطوط مشخصه ..... ۲۳
- شکل (۴-۱): نمایش ساده نوسانات فشاری بعد از خاموش شدن ناگهانی پمپ ..... ۲۵
- شکل (۵-۱): کاهش ناگهانی سرعت آب بعد از خروج کامل هوا از شیر و وقوع ضربه قوچ ..... ۲۷
- شکل (۶-۱): سرعت انتشار موج فشاری در خط لوله برای مقادیر مختلف هوا ..... ۲۹
- شکل (۷-۱): موقعیت یک حفره بخار در یک خط لوله ..... ۳۱
- شکل (۸-۱): روش نصب مستقیم چرخ لنگر روی الکترو موتور ..... ۴۰
- شکل (۹-۱): روش نصب چرخ لنگر با یاتاقان بندی مجزا و کوپلینگ هیدرولیکی روی شاسی مخصوص ..... ۴۰
- شکل (۱۰-۱): انواع مخزن هوای تحت فشار ..... ۴۳
- شکل (۱۱-۱): شیر تخلیه هوا ..... ۴۵
- شکل (۱۲-۱): شیر هوا خلاء ..... ۴۶
- شکل (۱۳-۱): دو نوع خاص از شیر ترکیبی هوا ..... ۴۶
- شکل (۱۴-۱): انواع شیر اطمینان ..... ۴۸
- شکل (۱۵-۱): دودکش خط لوله ..... ۴۹
- شکل (۱۶-۱): محل مناسب جهت استقرار مخازن موج گیر ..... ۵۱
- شکل (۱۷-۱): طریقه اتصال مخزن تغذیه به خط لوله ..... ۵۲
- شکل (۱۸-۱): نحوه اتصال مخزن موج گیر به خط لوله ..... ۵۳
- شکل (۱۹-۱): محل مناسب برای مخزن موج گیر ..... ۵۴
- شکل (۱-۲): تأثیر ضخامت و جنس لوله‌ها بر سرعت انتشار صوت ..... ۶۴
- شکل (۲-۲): منحنی هد - دبی پمپ برای خط انتقال مورد بررسی در نرم افزار Water Gems ..... ۷۴
- شکل (۳-۲): منحنی انتخاب شیر هوا ..... ۷۸
- شکل (۱-۳): اضافه فشارها و حجم بخار آب تولید شده در لوله در اثر پدیده ضربه قوچ ..... ۸۹

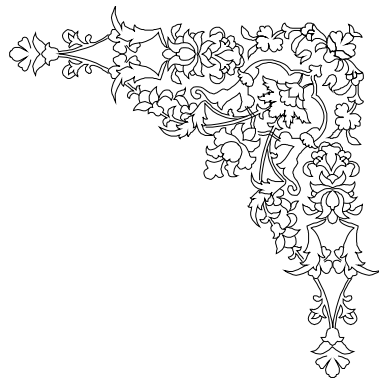
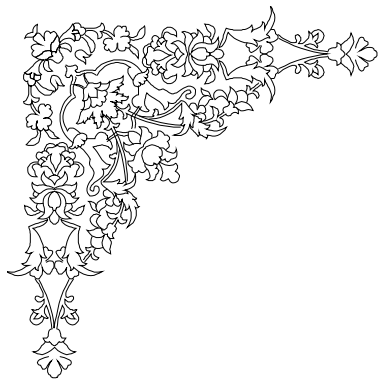
- شکل (۲-۳): تغییرات ماکزیمم فشار نسبت به زمان در نقطه بحرانی P12:J3 ..... ۹۲
- شکل (۳-۳): تغییرات مینیمم فشار نسبت به زمان در نقطه بحرانی P18:J9 ..... ۹۳
- شکل (۴-۳): تغییرات فشار نسبت به زمان در نقطه P-12:J-3 بعد از اضافه کردن شیر هوا ..... ۹۴
- شکل (۵-۳): تغییرات فشار نسبت به زمان در نقطه P-18:J-9 بعد از اضافه کردن شیر هوا ..... ۹۴
- شکل (۶-۳): اضافه فشارها و حجم بخار تولید شده در لوله در اثر پدیده ضربه قوچ با مخزن به حجم ۶۰ متر مکعب و قطر گلوبی ۲۵۰ میلی متر ..... ۹۸
- شکل (۷-۳): اضافه فشارها و حجم بخار تولید شده در لوله در اثر پدیده ضربه قوچ با مخزن به حجم ۶۵ متر مکعب و قطر گلوبی ۳۰۰ میلی متر ..... ۹۸
- شکل (۸-۳): اضافه فشارها و حجم بخار تولید شده در لوله در اثر پدیده ضربه قوچ با مخزن به حجم ۷۰ متر مکعب و قطر گلوبی ۳۰۰ میلی متر ..... ۹۸
- شکل (۹-۳): اضافه فشارها و حجم بخار تولید شده در لوله در اثر پدیده ضربه قوچ با مخزن به حجم ۷۵ متر مکعب و قطر گلوبی ۳۰۰ میلی متر ..... ۹۹
- شکل (۱۰-۳): اضافه فشارها و حجم بخار تولید شده در لوله در اثر پدیده ضربه قوچ با مخزن به حجم ۸۰ متر مکعب و قطر گلوبی ۴۰۰ میلی متر ..... ۱۰۰
- شکل (۱۱-۳): اضافه فشارها و حجم بخار تولید شده در لوله در اثر پدیده ضربه قوچ با مخزن به حجم ۹۰ متر مکعب و قطر گلوبی ۳۵۰ میلی متر ..... ۱۰۰
- شکل (۱۲-۳): اضافه فشارها و حجم بخار تولید شده در لوله در اثر پدیده ضربه قوچ با مخزن به حجم ۷۵ متر مکعب و قطر گلوبی ۳۵۰ میلی متر به اضافه چرخ لنگر ۱۳۵ نیوتن بر متر مربع ..... ۱۰۲
- شکل (۱۳-۳): اضافه فشارها و حجم بخار تولید شده در لوله در اثر پدیده ضربه قوچ با مخزن به حجم ۷۵ متر مکعب و قطر گلوبی ۳۵۰ میلی متر به اضافه چرخ لنگر ۱۴۵ نیوتن بر متر مربع ..... ۱۰۳
- شکل (۱۴-۳): اضافه فشارها و حجم بخار تولید شده در لوله در اثر پدیده ضربه قوچ با مخزن به حجم ۷۵ متر مکعب و قطر گلوبی ۳۵۰ میلی متر به اضافه چرخ لنگر ۱۵۵ نیوتن بر متر مربع ..... ۱۰۳

شکل (۳-۱۵): اضافه فشارها و حجم بخار تولید شده در لوله در اثر پدیده ضربه قوچ با مخزن به حجم ۷۵ متر

مکعب و قطر گلویی ۳۵۰ میلی متر به اضافه چرخ لنگر ۱۶۵ نیوتن بر متر مربع.....۱۰۴

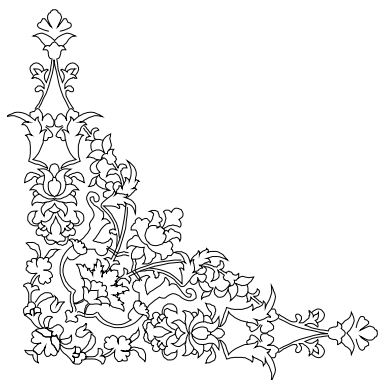
شکل (۳-۱۶): نتایج حاصل از اضافه کردن چهار مخزن موج گیر.....۱۰۸

- جدول (۱-۱): مقدار فشار ضربه قوچ که در طراحی مقدماتی خط لوله رعایت می‌شود..... ۳۶
- جدول (۱-۲): مشخصات کلی خط انتقال مورد بررسی ..... ۵۷
- جدول (۲-۲): پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه سرعت موج فشاری..... ۶۳
- جدول (۳-۲): محاسبه زمان تحلیل ..... ۶۶
- جدول (۴-۲): تخمین ضریب افت داریسی ویسباخ با استفاده از ضریب هیزن ویلیامز ..... ۶۸
- جدول (۵-۲): مشخصات فنی پمپهای خط انتقال مورد بررسی ..... ۷۳
- جدول (۶-۲): محاسبه قطر لوله خروجی از مخزن ضربه گیر تحت فشار ..... ۸۳
- جدول (۷-۲): محاسبه قطر لوله کنار گذر در مخزن ضربه گیر تحت فشار..... ۸۳
- جدول (۱-۳): اطلاعات کلی خط انتقال برای ورودی نرم افزار **Water Gems** ..... ۸۷
- جدول (۲-۳): نتایج بدست آمده از نرم افزار ..... ۸۸
- جدول (۳-۳): فشارها و حجم بخار آب تشکیل شده در خط انتقال مورد بررسی بر اثر پدیده ضربه قوچ ..... ۹۱
- جدول (۴-۳): فشارها و حجم بخار آب تشکیل شده در خط انتقال مورد بررسی پس از نصب شیرهای هوا ..... ۹۶
- جدول (۵-۳): فشارها در خط انتقال مورد بررسی پس از نصب مخزن هوای تحت فشار ..... ۱۰۶
- جدول (۶-۳): بهترین ابعاد برای تانک موج گیر ..... ۱۰۷



# فصل اول

## مقدمه و بررسی منابع



## ۱-۱- مقدمه

آب از دیر باز با زندگی بشر آمیخته بوده است، چنانچه حیات بدون آن میسر نبوده و بشر در تلاش بوده تا از این ماده حیاتی در بهبود و توسعه زندگی روزمره خویش بهره گیرد. در ابتدا، تلاش بشر به مهار و کنترل منابع آبی معطوف بوده، ولی با گذشت زمان و توسعه تمدن‌ها فکر انتقال آب به نقاط دوردست در ذهن بشر به وجود آمد و روز به روز گسترده‌تر شد. انتقال آب در گذشته به روش‌های سنتی مثل ایجاد قنات و کانال‌های آبیاری صورت می‌گرفت، اما امروزه روش‌های مختلفی برای انتقال آب وجود دارد که در میان آن‌ها مجاری تحت فشار به علت آنکه مقدار آب بیشتری را در زمان کوتاه‌تر منتقل می‌کنند، از اهمیت خاصی برخوردار هستند. طراحی و بهره‌برداری از این گونه سیستم‌ها همواره با مسائل خاص خود همراه است. یکی از مهم‌ترین این مسائل، تحلیل و بررسی جریان‌های غیر ماندگار<sup>۱</sup> است. طبق تعریف جریان غیر ماندگار به جریانی گفته می‌شود که خصوصیات هیدرولیکی سیال (دبی، فشار، سرعت و...) در هر نقطه آن با زمان تغییر کند. زمانی که شرایط جریان از یک حالت دائمی به یک حالت دائمی دیگر تغییر کند، شرایط جریان ما بین این دو حالت را جریان میرا<sup>۲</sup> می‌نامند. در خطوط لوله، جریان‌های میرا به طور عمده توسط بسته شدن شیرها، توقف ناگهانی پمپ و یا شروع به کار پمپ ایجاد می‌شود. چکش آبی<sup>۳</sup> یا ضربه قوچ یکی از پدیده‌های مخرب هیدرودینامیکی در جریان‌های تحت فشار ناپایدار است که بروز آن می‌تواند خسارات و صدمات جبران ناپذیری در خطوط انتقال آب، ایستگاه‌های پمپاژ و نیروگاه‌های برق آبی ایجاد نماید. بدین جهت لازم است که در مراحل طراحی و قبل از اقدام به اجرای طرح، پدیده یاد شده به دقت مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و راه‌حل‌های ممکن ارزیابی و مناسب‌ترین

---

<sup>1</sup> Unsteady Flow

<sup>2</sup> Transient

<sup>3</sup> Water Hammer

روش برای مقابله با آن در تأسیسات هیدرولیکی منظور شود. تحلیل جریان‌های غیر ماندگار در خطوط لوله به دو روش عمده صورت می‌گیرد. در روش اول موسوم به روش نظریه غیر الاستیک یا ستون صلب، سیال یک ماده تراکم ناپذیر و جداره لوله نیز انعطاف ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. معادلات بیان کننده این نوع جریان، دیفرانسیل ساده بوده و به راحتی قابل حل می‌باشد. در روش دوم، موسوم به نظریه الاستیک، خواص الاستیکی سیال و لوله در نظر گرفته می‌شوند. معادلات بیان کننده این حالت، دو معادله غیر خطی دیفرانسیل جزئی بوده که حل آن‌ها به روش تحلیلی میسر نیست لیکن با روش‌های عددی حل می‌شوند. در گذشته به علت عدم پیشرفت مبانی ریاضی عالی خصوصاً محاسبات عددی و نیز عدم دسترسی به کامپیوتر، روش‌های حل معادلات حاکم، عموماً با فرضیات ساده کننده‌ای همراه بوده که علاوه بر عدم دقت کافی و صرف وقت زیاد، منجر به نتایج نامطلوبی می‌گردید. امروزه با پیشرفت ریاضیات مهندسی و دسترسی آسان به ماشین‌های حسابگر، انجام محاسبات مربوط به ضربه قوچ به وسیله کامپیوتر، نتایج دقیق‌تر و سریع‌تری را ارائه می‌دهد.

روش‌های گوناگون کنترل ضربه قوچ، کلاً یک هدف مشترک را دنبال می‌کنند و آن تعدیل فشار ناشی از ضربه قوچ تا حد فشار قابل قبول در شبکه است. وسایل و تجهیزات مورد استفاده در سامانه‌های انتقال که جهت کنترل یا کاهش فشار ضربه قوچ به کار می‌روند، بر حسب نوع سامانه انتقال، بزرگی و کوچکی طرح، نوع لوله و نوع سیال، مقدار فشار ناشی از ضربه قوچ، اهمیت پروژه از نظر خسارت وارده احتمالی، نحوه بهره برداری و بالاخره هزینه‌های اجرایی سامانه حفاظت، متفاوت خواهند بود. این تجهیزات به دو دسته وسایل کنترل فشار ضربه قوچ در ایستگاه‌های پمپاژ و وسایل کنترل فشار ضربه قوچ در خطوط لوله طبقه بندی می‌شوند.



## ۱-۲- بررسی منابع

مطالعات ضربه قوچ عمدتاً از اواسط قرن نوزدهم شروع شده و همچنان ادامه دارد. مطالعات اولیه بر روی تئوری و استخراج رابطه‌های حاکم بر آن بوده است. سپس تلاش بر آن بوده که این پدیده را تحلیل کنند و در نتیجه بتوانند از عوامل مخرب آن جلوگیری نموده و آنرا تحت کنترل خود درآورند.

اولین کار انجام شده در ارتباط با ضربه قوچ کار وبر (۱۸۶۵) و میکادو (۱۸۷۸) می‌باشد. آن‌ها طبیعت موجی پدیده و اثر الاستیسیته لوله را در نظر گرفتند. میکادو (۱۸۷۸) رابطه زیر را برای ماکزیمم فشار بدست آورد: (به نقل از شین و والتین ۱۹۷۸)

$$H_M = \frac{2vL}{gT} \quad (1-1)$$

که در آن  $H_M$  ماکزیمم فشار ایجاد شده بر حسب ستون آب در لوله‌ای است که در بالادست آن مخزن و در پایین دست آن شیر قرار دارد که با بستن ناگهانی شیر ضربه قوچ ایجاد می‌شود.  $V$  سرعت جریان قبل از ضربه قوچ،  $L$  طول لوله،  $g$  شتاب جاذبه زمین و  $T$  زمان بسته شدن شیر است. از طرف دیگر ورتیم (۱۸۴۸) نشان داد که سرعت صوت در لوله‌های ساخته شده از مواد آلی که در آب غوطه ور هستند، کمتر از مقدار پیش بینی شده است. (به نقل از چمنی و تائبی، ۱۳۸۴) هلمهولتر در همان سال این اثر را ناشی از الاستیسیته لوله دانست. کورتوگ (۱۸۷۸) معادله زیر را برای سرعت موج در یک سیال درون مجرای الاستیک بدست آورد که اساس کارهای بعدی شد :

$$\frac{a}{a_0} = \sqrt{1 + \frac{kD}{Ee}} \quad (2-1)$$

که در آن  $a$  سرعت موج منتشر شده در مایع،  $E$  ضریب الاستیسیته لوله،  $e$  ضخامت جدار لوله،  $k$  مدول حجمی یانگ و  $a_0$  سرعت انتشار موج در جدار لوله می‌باشد. (به نقل از چمنی و تائبی، ۱۳۸۴) کورتوگ (۱۸۷۸) برای بدست آوردن رابطه فوق فرض کرد که تنش‌های طولی ایجاد شده در دیواره لوله ناچیز است و طول موج در مقایسه با قطر لوله بزرگ‌تر است. لامب (۱۸۹۸) با در نظر گرفتن تنش‌های طولی این مطالعات را توسعه داد. ژوکوفسکی (۱۹۰۳) نتایج آزمایشاتی را ارائه داد که مبنای همه تحلیل‌های ضربه قوچ در آینده قرار گرفت. او برای اولین بار ارتباط بین فشار موج  $p$  و یا بار آبی  $H$ ، سرعت موج و تغییر سرعت سیال را بدست آورد و برای یک توقف ناگهانی سیال روابط زیر را ارائه کرد:

$$\Delta p = \rho av \quad (۳ - ۱)$$

$$\Delta H = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{av}{g} \quad (۴ - ۱)$$

در توسعه این رابطه ژوکوفسکی اهمیت سرعت موج و اهمیت انعکاس موج در داخل لوله با توجه به زمان رفت و برگشت موج را در نظر گرفت و برای اولین بار رابطه قابل قبولی برای افزایش فشار با دانسیته سیال، سرعت موج و تغییرات سرعت بدست آورد. طبق گفته واترز (۱۹۸۴)، فریزل رابطه‌های مشابهی را در مورد تغییرات فشار با توجه به سرعت موج و سرعت جریان برای بستن ناگهانی شیر بدست آورد. هم‌زمان آلیوی (۱۹۰۳) در ایتالیا روابط ژوکوفسکی را با در نظر گرفتن همان فرضیات ژوکوفسکی و کورتورگ برای لوله بدون اصطکاک و توزیع یکنواخت سرعت بدست آورد که به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (۵ - ۱)$$

آلیوی (۱۹۰۳) معادله بالا را برای بستن آهسته شیر، مثلاً بستن در زمان طولانی‌تر از زمان رفت و برگشت موج توسعه داد. همچنین اولین روش گرافیکی بر اساس اصل برهم‌نهی امواج را برای تخمین تغییرات فشار در نقاط مختلف لوله توسعه داد.

تا سال ۱۹۱۳ تلاش برای بدست آوردن معادلات ضربه قوچ ادامه داشت و بعد از آن این تلاش بر روی حل معادلات این پدیده متمرکز شد. در سال ۱۹۱۵ جانسون تئوری ستون صلب را بیان کرد. گیبسون در سال ۱۹۲۰ تئوری الاستیک را بکار گرفت. به تدریج روش‌های مختلفی برای تحلیل این پدیده ارائه شد. آلیوی و ژوکوفسکی از روش حل تقریبی برای حل معادلات ضربه قوچ استفاده کردند. برای این منظور لازم است جملاتی که شامل عبارت غیر خطی هستند حذف شود و یا به نوعی عبارت غیر خطی آن‌ها تبدیل به عبارت خطی شود. ریچ (۱۹۴۵)، باشا و کاساب (۱۹۹۶) از روش تحلیل خطی برای حل این معادلات استفاده کردند. روشی که این محققین برای خطی کردن عبارت اصطکاک استفاده نمودند، اگرچه موفقیت آمیز بود اما برای سیستم‌های بسیار ساده نیز منجر به معادلات بسیار پیچیده ریاضی می‌شد. باشا و کاساب (۱۹۹۶) روش اختلال<sup>۱</sup> را برای این کار استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که با ترکیب معادلات تقریبی ضربه قوچ، معادله مرتبه دوم غیر خطی بدست می‌آید و چنانچه اصطکاک را به کمک روش اختلال بسط دهند پس از ساده سازی به مجموعه‌ای از معادلات درجه دو خطی تبدیل خواهد شد که هر معادله به جواب معادله قبل بستگی دارد و حل معادله اول این مجموعه برای تحلیل کافی است. اشنایدر (۱۹۲۹) و برگرون (۱۹۳۲) از روش ترسیمی برای حل این معادلات استفاده کردند (به نقل از چمنی و تائبی، ۱۳۸۴). در این روش، اصطکاک به وسیله افت‌های مجزا در طول خط لوله تحلیل شده در نظر گرفته می‌شود. امین و چو (۱۹۷۵) از روش تفاضل محدود ضمنی استفاده کردند. این محققان مشتقات مکانی را با استفاده از

<sup>۱</sup> Perturbation solution

تفاضل محدود مرکزی و مشتقات زمانی را با تفاضل محدود پیشرو تقریب زدند. همچنین بیان کردند که استفاده از تفاضل محدود پیشرو دقت بیشتری نسبت به تفاضل محدود مرکزی دارد (به نقل از چمنی و تائبی، ۱۳۸۴). روش مشخصه‌ها برای اولین بار توسط ریمن (۱۸۶۰) برای انتشار امواج صوتی بکار برده شد. ماسائو در سال ۱۹۰۰ این روش را برای جریان ماندگار در کانال‌های باز بکار برد. اولین کاربرد روش مشخصه‌ها برای ضربه قوچ به وسیله لمون انجام شد. سپس گری (۱۹۵۳)، ازگیال و پینتر (۱۹۵۷)، لیستر (۱۹۶۰)، و استریتر و همکاران (۱۹۶۰)، این کار را ادامه دادند. استریتر و لای (۱۹۶۲) بیان کردند که روش مشخصه‌ها معادل این است که افت اصطکاک به طور یکنواخت در طول لوله توزیع می‌شود و در واقع توسعه روش ترسیمی است. شاین و والتین (۱۹۷۸) روش مشخصه‌ها را در حالت دو بعدی بکار بردند. سیبتروس و همکاران (۱۹۹۱) میان یابی به روش اسپیلان درجه سه را در روش مشخصه‌ها بکار گرفتند. آن‌ها بیان کردند که جواب‌های حاصل از هر دو روش یکسان است، اما به علت استفاده از گام زمانی طولانی‌تر در این روش، محاسبات سریع‌تر خواهد بود. (به نقل از چمنی و تائبی، ۱۳۸۴).

پارمیاکان (۱۹۶۳) دو نمودار برای محاسبه سیستم‌های بدون شیر یک طرفه و با شیر یک طرفه ارائه کرد. با استفاده از این نمودارها می‌توان حداکثر سرعت معکوس پمپ، زمان معکوس شدن جریان در پمپ و زمانی که سرعت پمپ به صفر می‌رسد را محاسبه کرد. استیفنسون (۱۹۸۱) با در نظر گرفتن درجات مختلف کنترل و تنظیم افت ورودی آب به محفظه هوایی، نمودارهایی را ارائه کرد که این نمودارها برای کنترل و اجتناب از احتمال ایجاد جدایی ستون آب در لوله رانش و همچنین جهت تعیین حجم هوای مورد نیاز محفظه هوایی بکار می‌رود.