



پردیس بین المللی ارس  
گروه عمران - آب

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
در رشته‌ی عمران گرایش سازه‌های هیدرولیکی

عنوان

بررسی نحوه عملکرد پدیده ضربه قوچ و مقایسه راهکارهای کنترل آن  
با استفاده از مدل ریاضی Bentley Hammer  
( مطالعه موردی خط انتقال آب شرب شهرستان خوی )

استاد راهنما

دکتر کیومرث روشنگر

استاد مشاور

دکتر فرهود کلاته

پژوهشگر

علیرضا رضوی

پاییز ۹۳

## چکیده

پدیده ضربه قوچ به عنوان یک پدیده زودگذر، میرا و مخرب در سیستمهای انتقال و خطوط لوله می باشد که می تواند در اثر تغییر ناگهانی شرایط مرزی خط لوله در اثر باز و بسته شدن ناگهانی شیر فلکه، روشن و خاموش شدن ناگهانی پمپ و توربین، شکستگی خطوط انتقال، عدم دقت در پر کردن خطوط خالی در ابتدای راه اندازی و . . . ایجاد شود.

موجهای فشاری ناشی از این پدیده که در اثر تغییر سرعت بوجود می آیند تنش های بسیار زیادی در اجزای سیستم ایجاد نموده و موجب از بین رفتن لوله ها و اتصالات و پوسته پمپ می شود. میزان اضافه فشار وارده در اثر این پدیده به عوامل مختلفی از جمله قطر لوله، جنس لوله، ضخامت جدار لوله، ممان اینرسی پمپهای استفاده شده و غیره . . . بستگی دارد. در اثر این پدیده فشار وارده بر سیستم انتقال تا چندین برابر فشار در حالت کارکرد عادی سیستم شده و در صورت عدم اتخاذ تدابیر لازم جهت کنترل آن موجب وارد آمدن صدمات جبران ناپذیر به تأسیسات، لوله ها، پمپها، و اتصالات و غیره . . . خواهد شد. از جمله سیستمهای کنترل این پدیده می توان به شیرهای کنترل، چرخ طیار، محفظه هوایی و . . . اشاره کرد.

در این پایان نامه با مدل کردن خط انتقال آب شرب شهرستان خوی با استفاده از نرم افزار Bentley Hammer 8: XMV، روند تأثیر عوامل مؤثر در پدیده ضربه قوچ و سیستمهای کاهنده آن بررسی و درصد تأثیر هر کدام از عوامل مؤثر مورد مقایسه قرار گرفته است.

در این تحقیق مشخص گردید با افزایش قطر لوله از ۱۲۰۰ به ۱۶۰۰ میلیمتر در لوله های آهنی فشار ماکزیمم از ۴۷۹ به ۳۴۹ متر و به میزان ۲۷٪ کاهش می یابد.

با تغییر جنس لوله از آهنی به GRP و با کاهش مدول الاستیسیته لوله فشار ماکزیمم از ۴۷۹ به ۳۱۹ متر و به میزان ۳۳٪ کاهش می یابد.

با افزایش ممان اینرسی پمپ تا ۳ برابر، شاهد کاهش فشار ماکزیمم به میزان ۲۱٪ می باشیم و لیکن هیچکدام به تنهایی کنترل کننده فشار منفی نمی باشند.

با استفاده از لوازم حفاظتی تکی و ترکیبی نتیجه گیری گردید که مخزن ضربه گیر به همراه چرخ طیار با کنترل فشار ماکزیمم به میزان ۳۵٪ و کنترل فشار مینیمم بهترین کنترل کننده می باشند.

**واژگان کلیدی:** ضربه قوچ، فشار، سرعت موج، پمپ، محفظه هوا

فهرست مطالب ..... صفحه

## فصل اول : کلیات و مفاهیم اصلی

چکیده.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- کلیات و تعاریف.....	۲
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۴
۴-۱- اهداف و فرضیه‌های پژوهش.....	۵
۴-۱-۱- فرضیات.....	۵
۴-۱-۲- اهداف.....	۵
۵-۱- مفاهیم اصلی.....	۵
۱-۵-۱- چگونگی ایجاد ضربه قوچ در خط رانش تلمبه.....	۵
۲-۵-۱- جدایی ستون آب.....	۸
۳-۵-۱- امواج فشاری.....	۹
۴-۵-۱- ارتعاشات.....	۹
۵-۵-۱- خلاءزایی.....	۹

## فصل دوم : مبانی نظری و پیشینه تحقیق

۱-۲- مبانی نظری.....	۱۱
۱-۱-۲- طبقه‌بندی نظریه‌های مربوط به ضربه قوچ.....	۱۱
۱-۱-۱-۲- نظریه رفتار صلب ستون آب.....	۱۱
۲-۱-۱-۲- نظریه رفتار کشسانی.....	۱۱
۲-۱-۲- حل معادلات تفاضلی اثر موج فشاری در لوله‌ها (روش مشخصه).....	۱۲
۲-۲- پیشینه تحقیق.....	۱۵

## فصل سوم : مواد و روشها

۱-۳- روش تحقیق.....	۲۱
۱-۱-۳- عوامل ایجاد ضربه قوچ.....	۲۱
۱-۱-۱-۳- بسته شدن سریع شیرهای قطع و وصل.....	۲۱
۲-۱-۱-۳- از کار افتادن ناگهانی تلمبه.....	۲۲
۳-۱-۱-۳- پر کردن غیر اصولی خط لوله.....	۲۲
۴-۱-۱-۳- استفاده از شیرهای یک طرفه نامناسب.....	۲۳

۲۳	۳-۱-۲- عوامل موثر در شدت پدیده ضربه قوچ.....
۲۳	۳-۱-۲-۱- سیستم‌های پمپاژ با فشار کم و زیاد.....
۲۴	۳-۱-۲-۲- پروفیل خط لوله رانش.....
۲۵	۳-۱-۲-۳- تغییر قطر و جنس لوله در ضربه قوچ.....
۲۵	۳-۱-۲-۴- تأثیر انشعاب در ضربه قوچ.....
۲۶	۳-۱-۲-۵- تعداد پمپ‌ها.....
۲۶	۳-۱-۳- اقدامات و لوازم حفاظتی.....
۲۶	۳-۱-۳-۱- کنترل ضربه قوچ با تمهیدات اولیه در طراحی.....
۲۷	۳-۱-۳-۲- طراحی لوله رانش با سرعت کم.....
۲۷	۳-۱-۳-۳- افزایش ممان انرسی پمپ با چرخ طیار.....
۲۸	۳-۱-۳-۴- لوله‌های کنار گذر.....
۲۹	۳-۱-۳-۵- شیرهای یکطرفه.....
۳۱	۳-۱-۳-۶- استفاده از ترمزهای زبانه‌دار.....
۳۱	۳-۱-۳-۷- مخزن ضربه گیر یکطرفه.....
۳۲	۳-۱-۳-۸- مخزان موج گیر یا مخزن ضربه گیر دو طرفه.....
۳۲	۳-۱-۳-۹- مخزن ضربه گیر تحت فشار.....
۳۳	۳-۲- مطالعه موردی.....
۳۳	۳-۲-۱- کلیات.....
۳۳	۳-۲-۲- مشخصات طرح.....
۳۳	۳-۳- روش تجزیه و تحلیل داده‌ها.....
۳۴	۳-۳-۱- معرفی نرم افزار Bentley Hammer XM.V.۸.....
۳۴	۳-۳-۲- قابلیت‌های نرم افزار Bentley Hammer XM.V.۸.....

## فصل چهارم : نتایج و بحث

۳۷	۴-۱- صحت سنجی و کالیبراسیون نرم افزار.....
۳۷	۴-۱-۱- معرفی نتایج آزمایشگاهی آرایا (۱۹۹۳).....
۳۸	۴-۱-۲- نتایج مدل سازی در Bentley Hammer.....
۴۲	۴-۱-۳- نتایج اجرای برنامه.....
۴۴	۴-۱-۴- مقایسه نتایج بدست آمده از مدل در نرم افزار و نتایج آزمایش آرایا.....
۴۵	۴-۲- مدل سازی مطالعه موردی.....
۵۱	۴-۳- قطر لوله.....
۵۱	۴-۳-۱- مدل سازی جهت بررسی تأثیر قطر در پدیده ضربه قوچ.....

۶۶	۴-۳-۲- بررسی تأثیر ضخامت لوله در پدیده ضربه قوچ
۶۶	۴-۴- بررسی تأثیر جنس لوله در پدیده ضربه قوچ
۶۷	۴-۴-۱- مدل سازی جهت بررسی تأثیر جنس لوله در پدیده ضربه قوچ
۷۴	۴-۵- اقدامات حفاظتی
۷۴	۴-۵-۱- چرخ لنگر
۷۴	۴-۵-۱-۱- مدل سازی جهت بررسی تأثیر چرخ طیار در پدیده ضربه قوچ
۸۶	۴-۵-۲- شیر یکطرفه
۹۰	۴-۵-۳- شیر هوای دو روزه
۹۴	۴-۵-۴- شیر اطمینان
۹۸	۴-۵-۵- مخزن ضربه گیر تحت فشار
۱۰۳	۴-۵-۶- ترکیب مخزن ضربه گیر به همراه چرخ طیار
۱۰۷	۴-۵-۷- ترکیب شیر اطمینان با چرخ طیار
۱۱۰	۴-۵-۸- ترکیب شیر یکطرفه و چرخ طیار
۱۱۳	۴-۵-۹- ترکیب شیر یکطرفه و مخزن ضربه گیر

### فصل پنجم : نتیجه گیری

۱۱۸	۵-۱- نتیجه گیری
۱۲۳	۵-۲- جمع بندی
۱۲۴	پیشنهادات

## فهرست جداول ..... صفحه

جدول (۳-۱): مقدار فشار ضربه قوچی که در طراحی مقدماتی خطوط لوله رعایت می شود.....	۲۷
جدول (۴-۱): مشخصات و اطلاعات ورودی به نرم افزار منطبق بر آزمایش آرایا .....	۴۰
جدول (۴-۲): اطلاعات و مشخصات مدل و خط لوله مطابق آزمایش آرایا .....	۴۴
جدول (۴-۳): خروجی مربوط به مقادیر دقیق فشارهای بیشینه و کمینه از نرم افزار برای مدل آرایا .....	۴۴
جدول (۴-۴): مقایسه نتایج آزمایش آرایا و مدل Bentley Hammer.....	۴۵
جدول (۴-۵): مشخصات گره ها و مسیر خط لوله، تعریف شده در نرم افزار .....	۴۹
جدول (۴-۶): مقادیر هد، فشار بیشینه و کمینه مدل با لوله به قطرهای ۱۰۰۰ الی ۱۶۰۰ میلیمتر .....	۶۴
جدول (۴-۷): مقایسه نتایج بدست آمده در سه قطر لوله فولادی با قطرهای ۱۰۰۰ الی ۱۶۰۰ میلیمتر .....	۶۵
جدول (۴-۷-۱): اثر ضخامت جدار در ضربه قوچ در لوله فولادی به قطر ۱۲۰۰ میلیمتر .....	۶۶
جدول (۴-۸): مقادیر هد، فشار بیشینه و کمینه مدل .....	۷۲
جدول (۴-۹): مقایسه نتایج فشار بیشینه و کمینه در سه نوع لوله .....	۷۳
جدول (۴-۱۰): مقادیر هد، فشار بیشینه و کمینه مسیر پمپاژ، با ممان اینرسی های مختلف .....	۸۴
جدول (۴-۱۱): مقایسه نتایج بدست آمده برای پنج ممان اینرسی های مختلف .....	۸۵
جدول (۴-۱۲): مقادیر هد، فشار بیشینه و کمینه برای مدل با استفاده از شیرهای یکطرفه .....	۸۹
جدول (۴-۱۳): مقادیر هد، فشار بیشینه و کمینه برای مدل با استفاده از شیرهای هوا .....	۹۳
جدول (۴-۱۳-۱): مقادیر هد، فشار بیشینه و کمینه برای مدل با استفاده از شیر اطمینان .....	۹۷
جدول (۴-۱۴): مقادیر هد، فشار بیشینه و کمینه برای مدل با استفاده از تانک ضربه گیر .....	۱۰۱
جدول (۴-۱۵): جدول فشار حداکثر در حالت لحاظ مخزن ضربه گیر در پمپاژ ( $D=1200$ ) .....	۱۰۲
جدول (۴-۱۶): مقایسه نتایج بدست آمده برای چهار نوع لوازم حفاظتی .....	۱۰۲
جدول (۴-۱۷): مقادیر هد، فشار بیشینه و کمینه برای مدل با استفاده از تانک ضربه گیر همراه با چرخ طیار .....	۱۰۶
جدول (۴-۱۸): مقادیر هد، فشار بیشینه و کمینه برای مدل با استفاده از شیر اطمینان و چرخ طیار .....	۱۰۹
جدول (۴-۱۹): مقادیر هد، فشار بیشینه و کمینه برای مدل با استفاده از شیرهای یکطرفه و چرخ طیار .....	۱۱۲
جدول (۴-۲۰): مقادیر هد، فشار بیشینه و کمینه برای مدل با استفاده از شیرهای یکطرفه و مخزن ضربه گیر .....	۱۱۵
جدول (۴-۲۱): مقایسه نتایج بدست آمده برای ترکیب لوازم حفاظتی .....	۱۱۶
جدول (۵-۱): مقایسه قطر لوله فولادی در شدت فشار ضربه قوچ .....	۱۲۰
جدول (۵-۲): تأثیر ضخامت جدار لوله فولادی در شدت فشار ضربه قوچ در قطر ۱۲۰۰ میلیمتر .....	۱۲۰
جدول (۵-۳): تأثیر جنس لوله در شدت فشار ضربه قوچ در قطر ۱۲۰۰ میلیمتر .....	۱۲۱
جدول (۵-۴): تأثیر ممان اینرسی پمپ در شدت ضربه قوچ در لوله فولادی با قطر ۱۲۰۰ میلیمتر .....	۱۲۱
جدول (۵-۵): مقایسه انواع لوازم حفاظتی بصورت تکی در کنترل ضربه قوچ .....	۱۲۲
جدول (۵-۶): مقایسه عملکرد انواع لوازم حفاظتی به صورت ترکیبی در کنترل ضربه قوچ .....	۱۲۲

## فهرست نمودارها ..... صفحه

نمودار (۱-۴) : مقایسه نتایج داده‌های تجربی آرایا و نتایج نظریه کلاسیک.....	۳۸
نمودار (۲-۴) : مدل پیاده سازی شده آزمایش آرایا در نرم افزار Bentley Hammer.....	۴۱
نمودار (۳-۴) : وضعیت هیدرولیکی کل خط پس از بسته شدن شیر پروانه‌ای.....	۴۲
نمودار (۴-۴) : وضعیت فشار و دبی در وسط لوله‌های طی ۲ ثانیه پس از بسته شدن شیر.....	۴۳
نمودار (۵-۴) : وضعیت فشار و دبی در نزدیکی شیر پروانه‌ای طی ۲ ثانیه پس از بسته شدن شیر.....	۴۳
نمودار (۶-۴) : تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال لوله با قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر.....	۵۳
نمودار (۷-۴) : تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال لوله با قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر.....	۵۳
نمودار (۸-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در محل پمپ با لوله با قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر.....	۵۴
نمودار (۱-۸-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ در لوله با قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر.....	۵۴
نمودار (۹-۴) : تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال لوله با قطر ۱۴۰۰ میلی‌متر.....	۵۵
نمودار (۱۰-۴) : تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال لوله با قطر ۱۴۰۰ میلی‌متر.....	۵۶
نمودار (۱۱-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در محل پمپ در لوله با قطر ۱۴۰۰ میلی‌متر.....	۵۶
نمودار (۱-۱۱-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ در لوله با قطر ۱۴۰۰ میلی‌متر.....	۵۷
نمودار (۱۲-۴) : تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال لوله با قطر ۱۰۰۰ میلی‌متر.....	۵۷
نمودار (۱۳-۴) : تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال لوله با قطر ۱۰۰۰ میلی‌متر.....	۵۸
نمودار (۱۴-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در محل پمپ لوله با قطر ۱۰۰۰ میلی‌متر.....	۵۸
نمودار (۱۵-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ در لوله با قطر ۱۰۰۰ میلی‌متر.....	۵۹
نمودار (۱-۱۵-۴) : تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال لوله با قطر ۱۳۰۰ میلی‌متر.....	۶۰
نمودار (۲-۱۵-۴) : تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال لوله با قطر ۱۳۰۰ میلی‌متر.....	۶۰
نمودار (۳-۱۵-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در محل پمپ لوله با قطر ۱۳۰۰ میلی‌متر.....	۶۱
نمودار (۴-۱۵-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ در لوله با قطر ۱۳۰۰ میلی‌متر.....	۶۱
نمودار (۵-۱۵-۴) : تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال لوله با قطر ۱۶۰۰ میلی‌متر.....	۶۲
نمودار (۶-۱۵-۴) : تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال لوله با قطر ۱۶۰۰ میلی‌متر.....	۶۲
نمودار (۷-۱۵-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در محل پمپ لوله با قطر ۱۶۰۰ میلی‌متر.....	۶۳
نمودار (۸-۱۵-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ در لوله با قطر ۱۶۰۰ میلی‌متر.....	۶۵
نمودار (۱۶-۴) : مقایسه نتایج بدست آمده در لوله فولادی با قطرهای مختلف.....	۶۸
نمودار (۱۷-۴) : تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال لوله با جنس چدن داکتیل و قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر.....	۶۸
نمودار (۱۸-۴) : تغییرات فشار در طول مسیر جریان لوله با جنس چدن داکتیل و قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر.....	۶۹
نمودار (۱۹-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در محل پمپ با لوله چدن داکتیل به قطر ۱۲۰۰.....	۶۹
نمودار (۲۰-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ لوله با چدن داکتیل به قطر ۱۲۰۰.....	۷۰
نمودار (۲۱-۴) : تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال لوله با جنس GRP به قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر.....	۷۰
نمودار (۲۲-۴) : تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال لوله با جنس GRP به قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر.....	۷۱
نمودار (۲۳-۴) : تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در محل پمپ و لوله با جنس GRP به قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر.....	۷۱

- نمودار (۲۴-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ و لوله GRP به قطر ۱۲۰۰ میلیمتر ..... ۷۳
- نمودار (۲۵-۴): میزان فشار بیشینه در سه نوع لوله با قطر ۱۲۰۰ میلیمتر ..... ۷۶
- نمودار (۲۶-۴): تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال پمپ با ممان اینرسی ۴۳/۰۵ ..... ۷۶
- نمودار (۲۷-۴): تغییرات فشار در طول مسیر جریان پمپ با ممان اینرسی ۴۳/۰۵ ..... ۷۶
- نمودار (۲۸-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در محل پمپ با ممان اینرسی ۴۳/۰۵ ..... ۷۷
- نمودار (۲۹-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در بعد پمپ با ممان اینرسی ۴۳/۰۵ ..... ۷۷
- نمودار (۳۰-۴): تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال پمپ با ممان اینرسی ۵۷/۴ ..... ۷۸
- نمودار (۳۱-۴): تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال پمپ با ممان اینرسی ۵۷/۴ ..... ۷۸
- نمودار (۳۲-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در پمپ با ممان اینرسی ۵۷/۴ ..... ۷۹
- نمودار (۳۳-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ با ممان اینرسی ۵۷/۴ ..... ۷۹
- نمودار (۳۴-۴): تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال پمپ با ممان اینرسی ۷۱/۷۵ ..... ۸۰
- نمودار (۳۵-۴): تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال پمپ با ممان اینرسی ۷۱/۷۵ ..... ۸۰
- نمودار (۳۶-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در محل پمپ با ممان اینرسی ۷۱/۷۵ ..... ۸۱
- نمودار (۳۷-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ با ممان اینرسی ۷۱/۷۵ ..... ۸۱
- نمودار (۳۸-۴): تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال پمپ با ممان اینرسی ۸۶/۱ ..... ۸۲
- نمودار (۳۹-۴): تغییرات فشار در طول مسیر خط انتقال پمپ با ممان اینرسی ۸۶/۱ ..... ۸۲
- نمودار (۴۰-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در محل پمپ با ممان اینرسی ۸۶/۱ ..... ۸۳
- نمودار (۴۱-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ با ممان اینرسی ۸۶/۱ ..... ۸۳
- نمودار (۴۲-۴): مقایسه نتایج بدست آمده برای پنج ممان اینرسی ..... ۸۵
- نمودار (۴۲-۴): تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال با استفاده از شیر یکطرفه در میانه خط انتقال ..... ۸۷
- نمودار (۴۳-۴): تغییرات فشار در طول مسیر جریان با استفاده از شیر یکطرفه ..... ۸۷
- نمودار (۴۴-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ با استفاده از شیر یکطرفه ..... ۸۸
- نمودار (۴۵-۴): تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال با استفاده از شیر هوای دو روزنه ..... ۹۱
- نمودار (۴۶-۴): تغییرات فشار در طول مسیر جریان با استفاده از شیر هوای دو روزنه ..... ۹۱
- نمودار (۴۷-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ با استفاده از شیر هوای دو روزنه ..... ۹۲
- نمودار (۴۸-۴): تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال با استفاده از شیر اطمینان ..... ۹۵
- نمودار (۴۹-۴): تغییرات فشار در طول مسیر جریان با استفاده از شیر اطمینان ..... ۹۵
- نمودار (۵۰-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ با استفاده از شیر اطمینان ..... ۹۶
- نمودار (۵۱-۴): تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال با استفاده از تانک ضربه گیر به حجم ۲۰ مترمکعب ..... ۹۹
- نمودار (۵۲-۴): تغییرات فشار در طول مسیر جریان با استفاده از تانک ضربه گیر ..... ۹۹
- نمودار (۵۳-۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ ..... ۱۰۰
- نمودار (۵۴-۴): نمودار تغییرات گرایان حداقل و حداکثر در مقابل تغییرات حجم مخزن ضربه گیر ..... ۱۰۲
- نمودار (۵۵-۴): مقایسه نتایج بدست آمده برای چهار نوع لوازم حفاظتی ..... ۱۰۳
- نمودار (۵۶-۴): تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال با استفاده از تانک ضربه گیر همراه با چرخ طیار ..... ۱۰۴
- نمودار (۵۷-۴): تغییرات فشار در طول مسیر جریان با استفاده از تانک ضربه گیر همراه با چرخ طیار ..... ۱۰۴



- نمودار (۴-۵۸): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ همراه با چرخ طیار ..... ۱۰۵
- نمودار (۴-۵۹): تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال با استفاده از شیر اطمینان و چرخ طیار ..... ۱۰۷
- نمودار (۴-۶۰): تغییرات فشار در طول مسیر جریان با استفاده از شیر اطمینان و چرخ طیار ..... ۱۰۸
- نمودار (۴-۶۱): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ ..... ۱۰۸
- نمودار (۴-۶۲): تغییرات هد در طول مسیر خط انتقال با استفاده از شیر یکطرفه و چرخ طیار ..... ۱۱۰
- نمودار (۴-۶۳): تغییرات فشار در طول مسیر جریان با استفاده از شیر یکطرفه و چرخ طیار ..... ۱۱۱
- نمودار (۴-۶۴): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ ..... ۱۱۱
- نمودار (۴-۶۵): تغییرات هد در طول مسی در خط انتقال با استفاده از شیر یکطرفه و مخزن ضربه گیر ..... ۱۱۳
- نمودار (۴-۶۶): تغییرات فشار در طول مسیر جریان با استفاده از شیر یکطرفه و مخزن ضربه گیر ..... ۱۱۴
- نمودار (۴-۶۷): تغییرات هد و جریان نسبت به زمان در گره بعد از پمپ ..... ۱۱۴
- نمودار (۴-۶۸): مقایسه نتایج بدست آمده برای ترکیب لوازم حفاظتی ..... ۱۱۶

## فهرست اشکال ..... صفحه

- شکل (۱-۱): نمایش ساده نوسانات فشاری بعد از خاموش شدن ناگهانی تلمبه..... ۷
- شکل (۲-۱): منحنی فشار نسبت به زمان در ضربه قوچ و در نقطه شروع خط لوله..... ۸
- شکل (۳-۱): جدایی ستون آب در خط لوله..... ۸
- شکل (۱-۲): نمایش خطوط مشخصه در صفحه مختصات  $X$  و  $Y$ ..... ۱۴
- شکل (۲-۲): انواع مهارهای لوله..... ۱۷
- شکل (۳-۲): سرعت انتشار امواج فشاری در لوله های گوناگون انتقال آب..... ۱۷
- شکل (۱-۳): کاهش ناگهانی سرعت آب بعد از خروج کامل هوا از شیر و وقوع ضربه قوچ..... ۲۳
- شکل (۲-۳): پروفیل یک لوله رانش و منحنی کاهش فشار در زمانهای مختلف پس از کار افتادن پمپ..... ۲۴
- شکل (۳-۳): تأثیر قطر و جنس لوله در کاهش سرعت صورت..... ۲۵
- شکل (۴-۳): روش نصب مستقیم چرخ طیار بر روی الکتروموتور..... ۲۸
- شکل (۵-۳): نمونه‌ای از لوله کنارگذر در محل پمپ..... ۲۸
- شکل (۶-۳): چند نمونه از شیرهای یکطرفه..... ۳۰
- شکل (۷-۳): مخزن ضربه گیر و منحنی تأثیر مخزن ضربه گیر یکطرفه بر روی منحنی فشار منفی..... ۳۱
- شکل (۸-۳): نمایی از مخزن ضربه گیر تحت فشار..... ۳۲
- شکل (۱-۴): طرح آزمایش آرایا و داده‌های مربوطه..... ۳۷
- شکل (۳-۴): اعمال شرایط گذرا برای شیر پروانه‌ای در نرم افزار..... ۴۱
- شکل (۴-۴): شمای کلی از طرح انتقال آب از سد آغچای به شهرستان خوی..... ۴۶
- شکل (۵-۴): پلان و برش ایستگاه پمپاژ طرح..... ۴۷
- شکل (۶-۴): شرایط توپوگرافی منطقه و پروفیل خط لوله..... ۴۸
- شکل (۴-۷-الف): مدل ساخته شده در نرم افزار..... ۵۰
- شکل (۴-۷-ب): مدل ساخته شده ایستگاه پمپاژ در نرم افزار..... ۵۰
- شکل (۸-۴): تغییر قطر لوله در منوی Flex Table..... ۵۱
- شکل (۹-۴): تعریف حالت گذرا در سیستم..... ۵۲
- شکل (۱۰-۴): تعیین جنس لوله از کتابخانه نرم افزار..... ۶۷
- شکل (۴-۱۱-الف): ممان اینرسی قبل از در نظر گرفتن چرخ طیار..... ۷۵
- شکل (۴-۱۱-ب): افزایش ممان اینرسی با در نظر گرفتن چرخ طیار..... ۷۵
- شکل (۱۲-۴): مدل سازی و تعریف مشخصات شیرهای یکطرفه..... ۸۶
- شکل (۴-۱۳): مدل سازی و تعریف مشخصات شیرهای هوای دو روزه..... ۹۰
- شکل (۴-۱۴): مدل سازی و تعریف مشخصات شیر اطمینان..... ۹۴
- شکل (۴-۱۵): جایگذاری و تعریف مخزن ضربه گیر سیستم..... ۹۸
- شکل (۱-۵): فلوچارت کارهای انجام شده در عملکرد پدیده ضربه قوچ..... ۱۱۹

## ۱-۱- مقدمه

آب از گذشته‌های دور با زندگی بشر آمیخته بوده است، چنانکه حیات بدون آن میسر نبوده و بشر همواره در تلاش بوده تا از این ماده حیاتی در بهبود و توسعه زندگی روزمره خویش بهره گیرد و اولین تمدن‌ها نیز در کنار منابع آب شکل گرفته است. در ابتدا تلاش بشر به مهار و کنترل منابع آبی معطوف بود، ولی با گذشت زمان و توسعه تمدن‌ها فکر انتقال آب به دوردست در ذهن بشر بوجود 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 آن میان مجاری تحت فشار به دلیل اینکه مقدار آب بیشتری را در مدت زمان کوتاه‌تری منتقل می‌کنند، از اهمیت خاصی برخوردار هستند. طراحی و بهره‌برداری از اینگونه سیستمها همواره با مسائل خاصی همراه است. یکی از مهمترین مسائل تحلیل و بررسی جریانهای غیر ماندگار است. جریانهای غیر ماندگار در لوله‌ها، به شکل‌های گوناگون نمود پیدا می‌کند. ضربه قوچ یک پدیده در جریان غیر ماندگار است. پدیده ضربه قوچ در خطوط لوله جریان تحت فشار و مجاری باز اتفاق می‌افتد و به وضوح بر قوانین فشار، تغییرات دبی یا تغییرات سرعت جریان و شرایط مکانی و زمان حرکت سیال استوار است.

تغییر ناگهانی شرایط مرزی در سیستم‌های انتقال آب مانند باز و بسته شدن ناگهانی دریچه‌ها با استفاده از شیر فلکه، قطع و وصل شدن ناگهانی پمپ و توربین و نظیر اینها باعث ایجاد جریان گذرایی می‌گردد که اصطلاحاً ضربه قوچ نامیده می‌شود. موج‌های فشاری که به صورت پیاپی در طول ماده منتشر می‌شوند می‌توانند فشاری چندین برابر فشار کار سیستم را تولید کنند و موجب بوجود آمدن تنش‌های بسیار زیادی در اجزای مدار شده و در بدترین حالات قادر به از بین بردن لوله‌ها، پوسته پمپ و شکستن اتصالات گوناگون گردند به همین دلیل لازم است تا شرایط ایجاد این امواج شناخته شده و تا حد ممکن با به کار بردن تأسیساتی از بالا رفتن فشار تا حد خطرناک جلوگیری به عمل آید. از طرفی برای جریان آب که در داخل لوله حرکت می‌کند، تحت هر شرایطی می‌بایست معادله اندازه حرکت و پیوستگی همواره برقرار باشد پس می‌توان نتیجه گرفت که عواملی همچون جنس لوله، ضخامت جداره لوله، فشار داخل سیستم و سرعت سیال می‌توانند در رخ دادن این پدیده و میزان اثر آن موثر باشند.

## ۱-۲- کلیات و تعاریف

ضربه قوچ<sup>۱</sup> که در برخی از متون فارسی به عنوان چکش آبی نیز یاد شده است، در خطوط جریان تحت فشار اتفاق می‌افتد و بر قوانین فشار، تغییرات بده یا سرعت جریان و شرایط مکانی و زمانی حرکت سیال استوار است. در برخی از سامانه‌های هیدرولیکی تحت فشار، مانند خطوط انتقال آب، نفت یا شبکه‌های

توزیع و لوله‌های آب منتهی به توربین‌ها، تونل‌های آبی، سامانه‌های پمپاژ و جریان‌های ثقلی، پدیده ضربه قوچ با ایجاد موج‌های سریع و زودگذر و میرا موجب خطرات گوناگونی می‌شود، گاهی اوقات قدرت تخریبی این موج‌های فشار به حدی است که نتایج وخیمی به بار می‌آورد، ترکیدن خطوط لوله در سامانه‌های انتقال و شبکه‌های توزیع، خرابی و شکسته شدن شیرها، دریچه‌های کنترل و تلمبه‌ها از نمونه‌های بارز تأثیر این پدیده می‌باشد، به عنوان مثال در یک نمونه از حوادث تخریبی ضربه قوچ یک قطعه از جدار لوله به وزن ۱۲ تن تا فاصله ۵۰ متری پرتاب گردید.

## ضربه قوچ

این پدیده در اثر تغییر ناگهانی سرعت آب رخ می‌دهد، در بین مهندسان ایرانی به این پدیده ضربه آبی و یا اطمینان<sup>۱</sup> نیز گفته می‌شود. در ارتباط با کلمه اطمینان این نکته حائز اهمیت است که طبق تعاریف مندرج در کتاب‌های مرجع طراحی خطوط لوله، به تغییر سرعت ناچیز جریان آب و موج برگشتی ضعیفی که اثر تخریبی چندانی ندارد واژه اطمینان اطلاق می‌شود، به بیان دیگر باید گفت اطمینان یک ضربه قوچ ضعیف و فاقد اثر تخریبی می‌باشد.

## جریان دایمی و غیر دایمی<sup>۲</sup>

اگر مشخصات جریان مانند فشار، سرعت، گذر حجمی، چگالی، در یک نقطه از خط انتقال نسبت به زمان تغییری نداشته باشد جریان را دایمی می‌نامند و چنانچه این مشخصات نسبت به زمان تغییر کند جریان را غیر دایمی می‌نامند.

## حالت میرا یا جریان میرا<sup>۳</sup>

زمانی که شرایط از یک حالت دایمی به یک حالت دایمی دیگر تغییر کند، شرایط جریان مابین این دو حالت را حالت میرا می‌نامند.

## نرخ جریان یا بده<sup>۴</sup>

نرخ جریان یک مایع در مقطع معینی عبارت است از مقدار جرمی از مایع که در واحد زمان از این مقطع عبور می‌نماید.

## جریان نوسانی یا تناوبی<sup>۵</sup>

---

۱- Surge

۲- Steady & Unsteady State

۳- Transient State or Transient Flow

۴- Discharge

۵- Oscillatory or Periodic Flow

اگر شرایط جریان نسبت به زمان تغییر کند و این تغییرات پس از مدت معینی دوباره تکرار شود جریان را نوسانی می‌نامند و مدت زمانی که طول می‌کشد که یک وضعیت دوباره تکرار شود را تناوب می‌نامند.

### ۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

همچنانکه می‌دانیم جریان‌های گذرا<sup>۱</sup> معمولاً مشکلات جدی در خطوط انتقال و توزیع سیالات بوجود می‌آورند. باز و بسته شدن ناگهانی شیرها، از کار افتادن ناگهانی پمپ‌ها، شکستگی در خطوط لوله انتقال، عدم دقت در پر کردن خطوط خالی در ابتدای راه اندازی سیستم و ... از عوامل ایجاد جریان گذرا در خطوط لوله‌ها می‌باشد که می‌تواند باعث ایجاد فشارهای اضافی، صداهای مهیب، خلاءزایی و ارتعاشات در سیستم‌های مختلف شود.

انرژی جنبشی جریان آب در یک لوله می‌تواند بسیار قابل توجه باشد و هر کاهشی در میزان جریان بوسیله شیری که در انتهای سیستم، جریان را تنظیم می‌کند، ممکن است نیاز به استهلاک مقدار زیادی انرژی داشته باشد. این اتلاف انرژی در یک خط لوله بصورت ازدیاد فشار ظاهر می‌شود که می‌تواند اثرات مخربی داشته باشد.

از اینگونه حوادث که در طرح‌های آبی موجب تخریب می‌گردد فراوان مشاهده شده است. و همه ساله خسارات زیادی را بر سیستم‌های جریان تحت فشار تحمیل می‌نماید. البته در بعضی پروژه‌ها شدت تخریب ضربه قوچ به حدی نیست که به یکباره سیستم انتقال را فلج نماید، اما در همین سیستم‌ها نیز با تکرار این حادثه در هنگام بهره‌برداری، موجب می‌شود تا از کارآیی سیستم کاسته شده و نهایتاً به خطوط لوله، شیرآلات و دریچه‌ها، پمپ‌ها و توربین‌ها و سازه‌های اطراف سیستم‌های هیدرولیکی و یا تأسیسات مکانیکی مجاور صدمه وارد آید.

در واقع امروزه در کلیه طرح‌های انتقال آب یا سیستم‌های انتقال دیگر سیالات، بررسی و مطالعه دقیق ضربه قوچ به عنوان یک امر لازم و ضروری می‌باشد تا با شناخت کامل اثر آن، برای کنترل اثرات سوء این فرآیند تمهیدات مناسب اتخاذ گردد.

## ۱-۴- اهداف و فرضیه‌های پژوهش

### ۱-۴-۱- فرضیات

- ۱- ضربه قوچ یک جریان غیردائمی و میراست.
- ۲- نوع و کیفیت سیال در میزان سرعت موج در سیستم تأثیرگذار بوده و در نتیجه در میزان فشار ضربه قوچ نیز مؤثر است.
- ۳- نرم افزار Bentley Hammer با تحلیل معادلات پیوستگی و ممنوم قابلیت شبیه‌سازی چکش آبی را دارد.
- ۴- سیال تراکم پذیر تلقی شده و سرعت موج در سیستم به خواص و نوع سیال بستگی داشته و در پدیده ضربه قوچ مؤثر است.

### ۱-۴-۲- اهداف

هدف از انجام این پژوهش، بررسی نحوه عملکرد نحوه عملکرد پدیده ضربه و مقایسه راهکارهای کنترل با استفاده از مدل ریاضی Bentley Hammer جهت کاهش فشارهای ناشی از آن پدیده است، که برای نیل به این هدف اقدام به مدل کردن مسیر پمپاژ اول از خط لوله انتقال آب از رودخانه سد آغ‌چای به مخازن شهر خوی در نرم افزار <sup>۸</sup>: Bentley Hammer XMV کرده و به بررسی این پدیده تا رسیدن به یک نقطه عملی و بهینه پرداختیم.

## ۱-۵- مفاهیم اصلی

### ۱-۵-۱- چگونگی ایجاد ضربه قوچ در خط رانش تلمبه

پس از توقف ناگهانی موتور تلمبه، ابتدا سرعت تلمبه شروع به کاهش می‌نماید. در این زمان تنها انرژی که سبب ادامه دوران تلمبه می‌شود، انرژی جنبشی قسمت‌های چرخنده موتور تلمبه و مایع در حال حرکت می‌باشد.

به علت آنکه این انرژی کمتر از انرژی لازم در هنگام کار عادی تلمبه می‌باشد، بده و ارتفاع تلمبه‌زنی هم زمان شروع به کاهش می‌نمایند، این کاهش فشار بعد از حدود چند ثانیه در نزدیک تلمبه به کمترین حد خود می‌رسد و امواج منفی فشاری با کمتر از فشار کار تلمبه تشکیل می‌شوند. این امواج با سرعت زیاد در طول خط رانش به طرف انتهای آن حرکت می‌کنند، در همین حال سرعت تلمبه به حدی کاهش می‌یابد که دیگر هیچ بده‌ای تولید نمی‌شود.

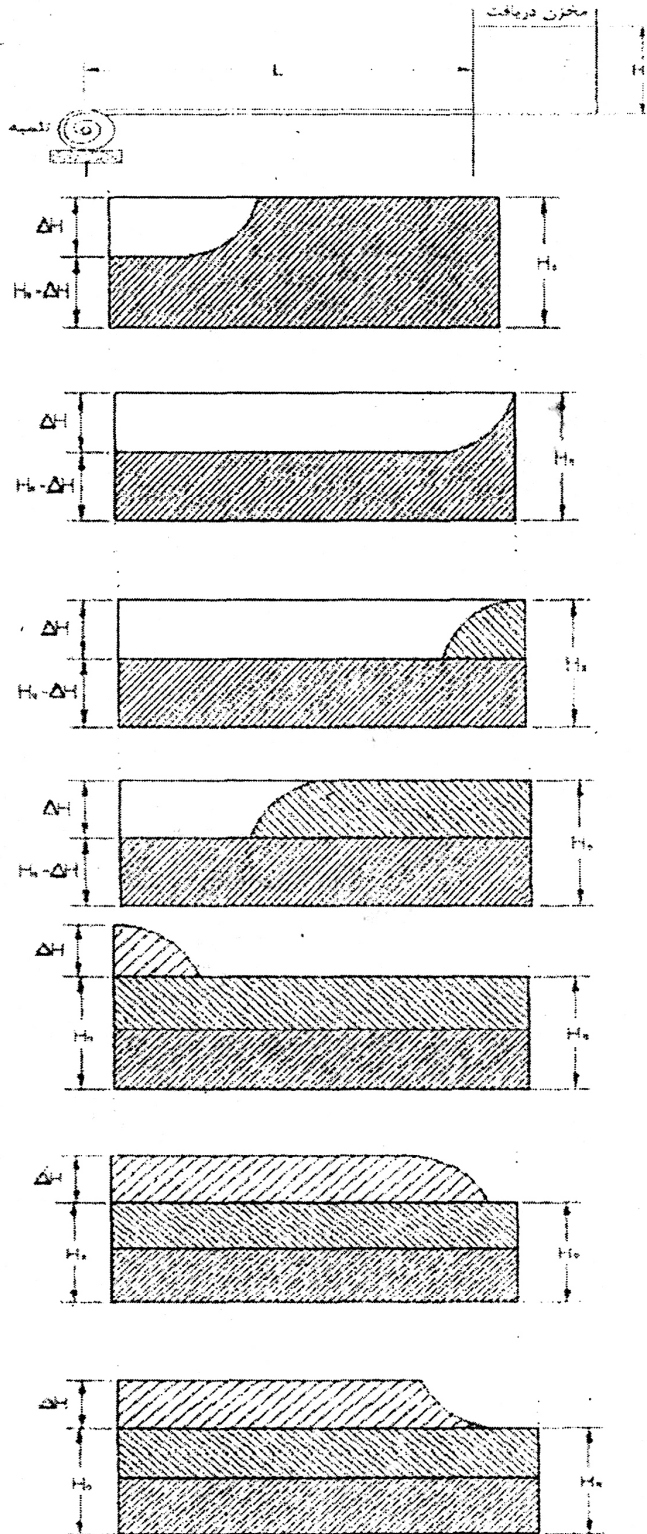
در شکل (۱-۱) تغییرات فشار در یک مدار ساده شامل تلمبه، شیر یک طرفه بعد از تلمبه، لوله‌ای به طول L و منبع دریافت، به هنگام خاموش شدن ناگهانی تلمبه مورد بررسی قرار گرفته است. خاطر نشان

می‌شود که از افت فشار ناشی از اصطکاک در این مدار صرف نظر شده است، در طول لوله نیز مایع وارد یا خارج نمی‌شود و فشار استاتیک حاکم بر لوله  $H_0$  می‌باشد. در این وضعیت اگر تلمبه به طور ناگهانی متوقف شود، سرعت مایع در زمان کوتاهی به صفر می‌رسد، این تغییر سرعت سیال از  $V_0$  (سرعت اولیه مایع در لوله) به صفر موجب کاهش فشار استاتیک از  $H_0$  به  $(H_0 - \Delta H)$  بعد از تلمبه می‌شود، شکل (۱-۱-ب).

موج با کاهش فشار  $\Delta H$ ، با سرعت (a) به طرف منبع دریافت حرکت می‌کند، فشار استاتیک در منبع دریافت برای  $H_0$  و با توجه به ارتفاع آب که در منبع ثابت است فشار موج برگشتی از منبع به طرف تلمبه برابر با فشار اولیه لوله یعنی  $H_0$  ولی در جهت مخالف خواهد بود، شکل‌های (۱-۱-ج، د، ه).

در این حالت  $\Delta H$  برابر صفر می‌شود، بعد از رسیدن موج برگشت به شیر یک طرفه روی تلمبه، چون این شیر بسته است به ناچار سرعت موج برابر صفر می‌شود و به همین جهت فشار به اندازه  $\Delta H +$  بالا می‌رود، شکل (۱-۱-و)، موج فشاری با فشار  $H_0 + \Delta H$  بار دیگر به طرف منبع حرکت می‌نماید، شکل (۱-۱-و).

هنگامی که این موج به منبع می‌رسد، به ناچار به علت ارتفاع ثابت آب در منبع بار دیگر فشارش به  $H_0$  خواهد رسید و سپس به طرف تلمبه حرکت خواهد کرد، شکل (۱-۱-ح)، این رفت و برگشت موج بار دیگر مطابق شکل‌های (۱-۱-ب تا ج) تا زمان میرا شدن آن ادامه یافته و سپس متوقف می‌شود. در نهایت می‌توان نمودار تغییرات فشار نسبت به زمان را در نقطه ابتدای خط لوله همانند شکل (۱-۲) را ترسیم نمود.



الف- تلمبه بده ثابتی را از لوله‌ای به طول  $L$  ارسال می‌کند.

ب- تلمبه به سرعت متوقف و یا شیر بسته و موجی با کاهش فشار  $\Delta H$  به طرف منبع حرکت می‌کند.

ج- لحظه رسیدن موج با کاهش فشار به منبع

د- موج با کاهش فشار به صورت یک موج با افزایش فشار از منبع بر می‌شود.

ه- موج با افزایش فشار به طرف تلمبه حرکت می‌کند.

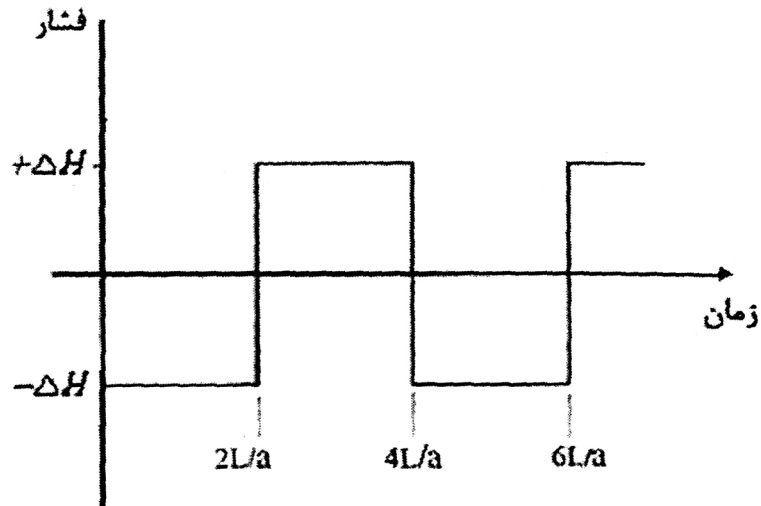
و- موج با افزایش فشار به شیر یک‌طرفه بسته می‌رسد و با فشاری برابر  $H_0 + \Delta H$  منعکس می‌شود.

ز- این موج فشاری به طرف منبع حرکت می‌کند.

ح- با رسیدن موج فشاری به مخزن دوباره به صورت موجی با کاهش فشار به طرف تلمبه بر می‌شود. این سیکل دوباره از حالت ب تکرار می‌شود.

شکل (۱-۱): نمایش ساده نوسانات فشاری بعد از خاموش شدن ناگهانی تلمبه

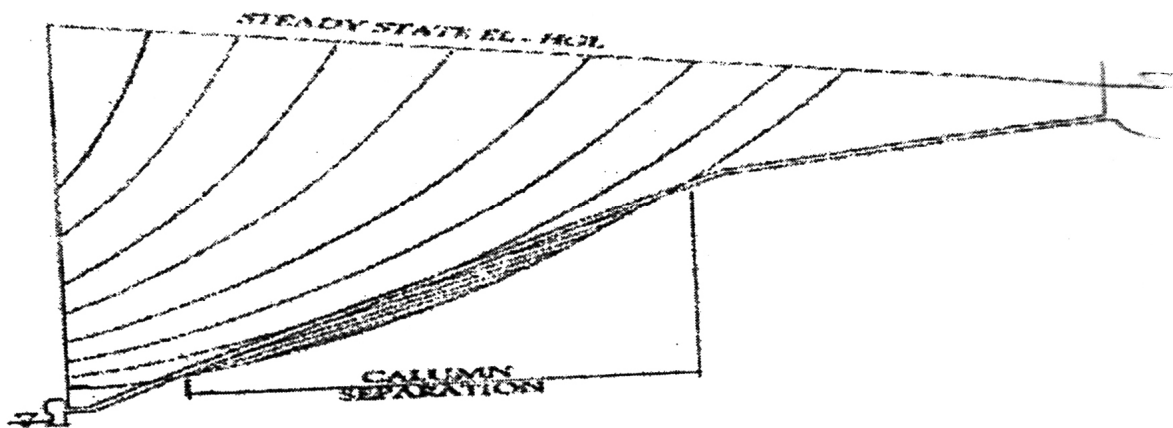




شکل (۲-۱): منحنی فشار نسبت به زمان در ضربه قوچ و در نقطه شروع خط لوله

### ۱-۵-۲- جدایی ستون آب

جدایی ستون آب یکی از اثرات پدیده ضربه قوچ است که در هنگام پریود کاهش فشار در خط رانش پمپ بوجود می‌آید. علت پدید آمدن این مسئله به صورت زیر است. هنگامی که پمپ به طور ناگهانی از کار می‌افتد، موج‌هایی با کاهش فشار در محل پمپ به وجود می‌آید که با سرعت زیاد به طرف انتهای خط لوله حرکت می‌کنند. حال اگر در پروفیل خط لوله شرایط هیدرولیکی جریان به گونه‌ای باشد که این موج‌ها در نقطه‌ای از لوله از فشار بخار آب پایین‌تر بیاید، آب تبخیر شده و دو ستون سیال از یکدیگر جدا می‌شوند، این پدیده را جدایی ستون آب می‌نامند شکل (۳-۱)



شکل (۳-۱): جدایی ستون آب در خط لوله

در صورت وقوع این پدیده هنگامی که در پیوند بعد، موج‌های با فشار بالا به طرف پمپ حرکت می‌کنند، فشار در محل جدایی بالا رفته و سبب تقطیر ناگهانی بخارها می‌گردد. به علت این کاهش حجم ناگهانی، دو ستون جدا شدن آب به شدت به یکدیگر برخورد می‌نمایند. این مسئله تولید فشارهای زیادی نموده و حتی می‌تواند موجب وارد آمدن خسارات جدی به ایستگاه پمپاژ خط لوله و تجهیزات مربوطه شود. لازم به ذکر است، احتمال بروز پدیده جدایی ستون آب معمولاً در مرتفع‌ترین نقاط سیستم که نزدیک به خط شیب هیدرولیکی<sup>۱</sup> فشار هستند وجود دارد.

### ۱-۵-۳- امواج فشاری<sup>۲</sup>

هر گاه در نقطه‌ای از یک ماده الاستیک تغییر فشار بوجود آید، ماده در آن محل تغییر اندازه می‌دهد و اثر این تغییر را با سرعتی که به سرعت صوت در آن ماده مشهور است، به نقطه کناری خود منتقل می‌کند و این توالی عمل در طول ماده انتشار می‌یابد. فرض کنید یک جرم جامد طولانی مانند ریل آهن در نقطه A یک ضربه چکش دریافت کند. نقطه تماس ریل با چکش به اندازه  $\Delta y$  و در حد الاستیک خود، از نقطه اولیه خارج شده و سپس به وضعیت اول خود باز گردد. اثر حرکت نقطه A به صورت کشیدگی به نقطه کناری، B منتقل می‌شود و این نقطه را به موقعیت لحظه قبل خود نزدیک می‌کند، ضمن این تحول، نقطه A در حال بازگشت به محل اولیه خود است. نقطه B این کشش را به نقطه بعد از خود C منتقل می‌کند، ضمن اینکه نقطه B، به دنبال A، در حال برگشت به محل اولیه خود است. این پدیده که پیاپی به صورت موج در طول ماده منتشر می‌شود، به امواج فشاری موسوم است.

### ۱-۵-۴- ارتعاشات

ارتعاشات ناشی از جریان غیرماندگار می‌تواند اثرات قابل توجهی در خطوط لوله ایجاد کند. ارتعاشات شدید جریان‌های غیرماندگار از آنجا ناشی می‌شود که بعضی جریان‌های متناوب باعث تهییج تجهیزات خطوط لوله در فرکانس نزدیک به فرکانس طبیعی آنها می‌شود. در این حالت، تنشها و تغییر شکل‌های بزرگ (به همراه صدا) اتفاق می‌افتد که ممکن است سیستم را دچار اشکال نماید.

### ۱-۵-۵- خلاءزایی

تقطیر و تبخیر سریع باعث خلاءزایی می‌شود که این مساله یکی از عوارض جریان‌های غیرماندگار است. معمولاً حفره‌های بخار هنگامی تشکیل می‌شوند که فشار سیال توسط عوامل دینامیکی و یا استاتیکی مساوی فشار بخار سیال و یا کمتر از آن شود. این حفره‌ها در اثر کاهش منبسط می‌شوند. هنگامی که فشار اطراف این حفره‌ها به بیش از فشار بخار افزایش یابد، حفره‌ها ناپدید شده و فرو می‌ریزند. این امر باعث ایجاد صدا، ارتعاش و احتمالاً صدمه زدن به سطوح سخت می‌شود. به طور کلی خلاءزایی در سیستم‌های انتقال و توزیع آب پنج دسته مشکل، صدا، ارتعاشات، نوسانات فشار، فرسایش و کاهش دبی ایجاد می‌کند.

۱- Hydraulic Gradient Line

۲- Pressure Wave

## فصل دوم

### مبانی نظری و پیشینه تحقیق

## ۲-۱- مبانی نظری

### ۲-۱-۱- طبقه‌بندی نظریه‌های مربوط به ضربه قوچ

جهت مطالعه و بررسی پدیده ضربه قوچ لازم است به نظریه‌ها و دیدگاه‌های متفاوتی که در مورد چگونگی تجزیه و تحلیل این پدیده بیان شده اشاره گردد. بطور معمول در سیستم‌های انتقال سیال، فرآیند ضربه قوچ دارای دو نظریه «رفتار صلب ستون آب» و «نظریه رفتار کشسانی» می‌باشد.

### ۲-۱-۱-۱- نظریه رفتار صلب ستون آب

در نظریه رفتار صلب ستون آب<sup>۱</sup> فرآیند این ضربه بدین نحو توجیه می‌گردد که در نتیجه اختلاف فشاری که بین دو سر ستون آب بوجود می‌آید، شتابی آنی حاصل می‌گردد. این نظریه براساس فرضیات زیر بنا شده است :

۱- جریان در سیستم انتقال به عنوان یک جریان دائمی و پایدار فرض می‌شود و لذا دبی و سرعت جریان نسبت به زمان تغییر نمی‌یابد، یا به عبارت دیگر :

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dV}{dt} = 0$$

۲- لوله جریان به صورت کاملاً صلب فرض می‌شود و لذا کاهش یا افزایش موجب کرنش جدار لوله نخواهد شد.

۳- سیال داخل لوله جریان غیرقابل تراکم بوده و لذا وزن مخصوص آن تحت تأثیر فشار قرار نمی‌گیرد و یا به عبارت دیگر:

$$\frac{d\gamma}{dp} = \frac{d\rho}{dp} = 0$$

گرچه تا حدودی بعضی از سیالات در فشارهای کم غیرقابل تراکم می‌باشند و یا لوله‌های جریان به صورت صلب عمل می‌نمایند، اما تقریباً در موارد نادری می‌توان از نقطه نظر فیزیکی بر فرضیات فوق صحنه گذاشت.

### ۲-۱-۱-۲- نظریه رفتار کشسانی

در نظریه رفتار کشسانی<sup>۲</sup> پدیده ضربه قوچ به صورت جامع‌تری بررسی می‌گردد. در این حالت که به واقعیت امر نیز نزدیکتر است، سیال را قابل تراکم در نظر گرفته و جدار لوله جریان نیز کرنش پذیر بوده و با افزایش و کاهش فشار ضربه قوچ، در جهت طول و قطر لوله انبساط و انقباض رخ می‌دهد. در واقع در نظریه فوق، گسترش موج فشار در مسیر جریان یا خط لوله با توجه به تراکم پذیری سیال و کشسانی لوله بررسی و مطالعه می‌شود. فرمولها و معادلاتی که بر اساس این نظریه جهت تجزیه و تحلیل مسایل ضربه قوچ ارائه

۱- Rigid Column Theory

۲- Elastic Theory