

بسم الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدروليکی

بهبينه يابی سيستم های پمپاژ گروهی سری و موازی در شبکه لوله ها

نگارنده: مژگان ابراهيم پور

استاد راهنما

دکتر احمد احمدی

استاد مشاور

امير پارسا صدر

بهبين ۱۳۹۷

شماره: ۸۲/۴۱
تاریخ: ۹۷/۱۱/۲۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای مژگان ابراهیم پور با شماره دانشجویی ۹۵۰۰۶۲۴ رشته مهندسی عمران گرایش آب و سازه های هیدرولیکی تحت عنوان بهینه یابی سیستم های پمپاژ گروهی سری و موازی در شبکه لوله ها که در تاریخ ۹۷/۱۱/۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه:) ☒ ☐ مردود			
نوع تحقیق: ☐ نظری ☐ عملی			
اعضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر احمد احمدی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور	مهندس امیر پارسا سدر	-	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سید فضل الله سافروشی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مهدی عجمی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: رضا نادری

دانشکده مهندسی و فناوری اطلاعات

آموزش تحصیلات تکمیلی

تیسره در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر مجاز است (می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید) (دفاع

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

شکر و قدردانی

قبل از هرچیز، لازم می‌دانم که از زحمات و رهنمودهای استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر احمد احمدی که پیوسته از آموزش، راهنمایی، تشویق و هدایت‌های بی‌پشتم داشت ایشان بهره‌جتم، شکر و قدردانی نمایم. هم‌چنین از زحمات بی‌دینغ استاد مشاور محترم، مهندس امیر پاسا صدر که با در اختیار گذاشتن آموزش و منابع متعدد مراد نخواستش این پایان‌نامه‌یاری نمودند، شکر می‌کنم.

در آخر از پدر، مادر و برادرم که همواره حامی بنده بوده و آرامش خیال به من هدیه داده‌اند بی‌نهایت سپاسگذارم.

تعهدنامه

اینجانب **مژگان ابراهیم پور** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران-گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **بهینه‌یابی سیستم‌های پمپاژ گروهی سری و موازی در شبکه لوله‌ها** تحت راهنمایی جناب آقای دکتر احمد احمدی و مشاوره مهندس امیر پارسا صدر 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 تاکنون 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 صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست 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.

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) 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.

چکیده:

در سیستم‌های بزرگ انتقال آب به‌منظور تامین هد موردنظر، از چندین ایستگاه پمپاژ آب استفاده می‌شود که بعضاً به دلیل دبی بالای سیستم، هر ایستگاه خود متشکل از چندین پمپ موازی است. خاموشی یا ازکارافتادگی هر یک از این پمپ‌ها جریان غیرماندگاری در خط لوله ایجاد می‌کند که باعث نوسانات فشار در خط لوله می‌شود. بررسی و کنترل حداکثر و حداقل فشارهای وارد بر خط لوله نقش مهمی در طراحی و بهره‌برداری از خطوط انتقال آب ایفا می‌کند. یکی از راه‌کارهای محدود کردن فشارهای وارد بر خط لوله، خاموشی گام‌به‌گام پمپ‌ها است. هدف اصلی این تحقیق ارائه ترتیب خاموشی و فاصله زمانی بهینه خاموشی پمپ‌ها در دوگام در یک سیستم انتقال آب بزرگ است به‌نحوی که فشار بیشینه و کمینه وارد بر خط انتقال، همواره در محدوده مجاز باقی بماند.

بدین منظور لازم است ابتدا مدل‌سازی عددی جامعی از سیستم انتقال آب با چند ایستگاه پمپاژ سری و چندین پمپ موازی در هر ایستگاه صورت پذیرد تا جریان غیرماندگار ناشی از ضربه قوچ در این سیستم شبیه‌سازی شود. در روند این شبیه‌سازی، معادلات حاکم بر جریان که معادله پیوستگی و مومنوم هستند با روش خطوط مشخصه صریح و معادلات حاکم بر پمپ‌های موازی که شامل معادلات هد و گشتاور است با روش عددی نیوتن رافسون حل شده‌اند. این مدل شبیه‌ساز به‌صورت تابعی به الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم معرفی شده است. در این الگوریتم برای تولیدمثل دانه‌های مربوط به ترتیب خاموشی از تولیدمثل باینری و برای تولیدمثل دانه‌های مربوط به فاصله زمانی بین خاموشی دوگام، از تولیدمثل استاندارد استفاده شده است. فشار بیشینه و کمینه در این الگوریتم بهینه می‌شود بدین ترتیب که فشارهای بیشینه، به کمترین مقدار ممکن و فشارهای کمینه به بیشترین مقدار خود می‌رسند و ترتیب خاموشی و فاصله زمانی خاموشی بین دو گام مرتبط با آن‌ها نیز ارائه می‌شود. این خروجی‌ها برای طول‌هایی مختلفی از لوله و تعداد مختلف ایستگاه بسط داده و تحلیل می‌شوند.

با بررسی محدودی نشان داده شد که ترتیب خاموشی می‌تواند تاثیر بسزایی در فشارها وارد بر خط انتقال آب بگذارد و می‌توان تنها با انتخاب ترتیب خاموشی مشخص و فاصله زمانی بین خاموشی دوگام

از خرابی‌های احتمالی ناشی از ضربه قوچ جلوگیری کرد. از آن جایی که ترکیب الگوی خاموشی و فاصله زمانی بین دو گام خاموشی پمپ‌ها می‌تواند مقادیر بسیار متنوعی اختیار کند، راه‌کار پیشنهادی برای به‌دست آوردن فشار موردنظر، بهینه‌سازی از طریق یک الگوریتم بهینه‌ساز فراکاوشی است. با بهینه‌سازی با الگوریتم علف‌های هرز، فاصله زمانی و الگوی خاموشی برای چند سیستم پمپاژ گروهی استخراج گردید. این متغیرهای در هر سیستم انتقال آب وابسته به تعداد پمپ، قدرت پمپ و طول لوله‌ها است، به‌همین دلیل نمی‌توان الگویی کلی ارائه داد. اما بسته به سیستم‌های پمپاژ با تعداد معینی پمپ، می‌توان بازه‌ای برای آن ارائه نمود. هم‌چنین، تاثیر تغییر طول در نتایج بهینه‌سازی ارائه گردید و این نتیجه حاصل شد که با کاهش طول لوله‌ها فشارهای ماکزیمم روند کاهشی و فشارهای مینیمم روند افزایشی در پیش می‌گیرند که نرخ این تغییر بسته به قدرت پمپ متفاوت است.

کلمات کلیدی: ضربه قوچ، سیستم پمپاژ موازی، الگوریتم علف‌های هرز مهاجم، خاموشی

گام‌به‌گام پمپ، خطوط مشخصه صریح، جریان ماندگار و غیرماندگار.

مقالات استخراج شده از پایان نامه

۱. ابراهیم پور م.، احمدی ا. و پارسا صدر ا.، (۱۳۹۷)، "بهینه سازی سیستم پمپاژ گروهی در سیستم انتقال آب با استفاده از الگوریتم علف های هرز مهاجم"، کنفرانس آب و فاضلاب، اصفهان، ایران.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۲-۱- اهداف و فرضیات پایان نامه ۳

۳-۱- فصل بندی پایان نامه ۴

فصل دوم: مبانی، تاریخچه و مطالعات پیشین ۷

۱-۲- مبانی ۸

۱-۱-۲- بررسی فیزیکی پدیده ضربه قوچ ۸

۲-۱-۲- پمپها ۱۱

۳-۱-۲- عملکرد پمپها ۱۲

۴-۱-۲- عملکرد پمپها در قطع ناگهانی برق ۱۲

۵-۱-۲- الگوریتمهای بهینه سازی فراکاوشی ۱۳

۲-۲- تاریخچه ضربه قوچ ۱۴

۳-۲- جریان غیرماندگار ناشی از خاموشی سیستمهای پمپاژ ۱۶

۴-۲- مروری بر منابع بهینه سازی ۱۸

فصل سوم: مدل ریاضی و روش حل عددی ۲۱

۱-۳- ضربه قوچ و معادلات حاکم ۲۲

۱-۱-۳- معادلات حاکم بر هیدرولیک جریان ۲۳

۲-۱-۳- حل عددی معادلات هیدرولیک جریان با روش MOC ۲۴

۲۹.....	۳-۱-۳- معادلات حاکم بر پمپ‌های موازی.....
۳۰.....	۳-۱-۳-۱- منحنی مشخصه پمپ.....
۳۱.....	۳-۱-۳-۲- معادله تعادل هد در ایستگاه پمپاژ موازی.....
۳۳.....	۳-۱-۳-۳- معادله تعادل تغییر سرعت در ایستگاه پمپاژ موازی.....
۳۴.....	۳-۱-۴- حل معادلات حاکم بر پمپ‌ها.....
۳۷.....	۳-۱-۴-۱- شرایط مرزی مخزن بالادست.....
۳۸.....	۳-۱-۴-۲- شرایط مرزی مخزن پایین‌دست.....
۳۸.....	۳-۱-۵- روش حل معادلات حاکم بر پمپ‌های موازی با روش عددی نیوتن رافسون.....
۴۰.....	۳-۲- مدل الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم.....
۴۱.....	۳-۲-۱- متغیرهای بهینه.....
۴۱.....	۳-۲-۲- توابع هدف.....
۴۱.....	۳-۲-۳- اعمال قید و تابع پناستی.....
۴۲.....	۳-۲-۴- تولید جمعیت اولیه تصادفی.....
۴۳.....	۳-۲-۵- تولیدمثل.....
۴۴.....	۳-۲-۵-۱- تولیدمثل استاندارد.....
۴۵.....	۳-۲-۵-۲- تولیدمثل باینری.....
۴۵.....	۳-۲-۶- حذف رقابتی.....
۴۶.....	۳-۳- روند کلی حل عددی.....
۴۹.....	فصل چهارم: صحت‌سنجی و ارائه نتایج.....
۵۰.....	۴-۱- مقدمه.....
۵۰.....	۴-۲- صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز.....
۵۲.....	۴-۳- خاموشی پمپ‌های همسان در سیستم انتقال آب.....

۵۶.....	۴-۳-۱- اثر تغییر طول لوله بین ایستگاه‌های پمپاژ.....
۵۸.....	۴-۴- خاموشی پمپ‌های ناهمسان در سیستم انتقال آب.....
۶۰.....	۴-۵- بهینه‌سازی خط انتقال آب.....
۶۱.....	۴-۵-۱- بهینه‌سازی سیستم انتقال آب با پمپ‌های همسان.....
۷۰.....	۴-۵-۱-۱- تاثیر طول لوله‌ها در بهینه‌سازی سیستم پمپ‌های همسان.....
۷۳.....	۴-۵-۱-۲- تاثیر تغییر تعداد ایستگاه پمپاژ.....
۷۶.....	۴-۵-۲- بهینه‌سازی سیستم انتقال آب با پمپ‌های ناهمسان.....
۷۸.....	۴-۵-۲-۱- تاثیر طول لوله‌ها در بهینه‌سازی سیستم پمپ‌های ناهمسان.....
۸۱.....	فصل پنجم: خلاصه، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات.....
۸۲.....	۵-۱- خلاصه.....
۸۲.....	۵-۲- نتیجه‌گیری.....
۸۳.....	۵-۲-۱- خاموشی پمپ‌های همسان در سیستم انتقال آب.....
۸۳.....	۵-۲-۲- اثر تغییر طول لوله‌های بین ایستگاه‌های پمپاژ.....
۸۳.....	۵-۲-۳- خاموشی پمپ‌های ناهمسان در سیستم انتقال آب.....
۸۴.....	۵-۲-۴- بهینه‌سازی سیستم انتقال آب همسان.....
۸۴.....	۵-۲-۵- تاثیر تغییر طول لوله بر نتایج بهینه‌سازی پمپ‌های همسان.....
۸۵.....	۵-۲-۶- اثر تغییر تعداد ایستگاه پمپاژ.....
۸۵.....	۵-۲-۷- بهینه‌سازی سیستم انتقال آب ناهمسان.....
۸۶.....	۵-۲-۸- تاثیر تغییر طول لوله بر نتایج بهینه‌سازی پمپ‌های ناهمسان.....
۸۶.....	۵-۳- پیشنهادات برای ادامه کار.....
۸۹.....	پیوست.....

منابع ۹۵

منابع فارسی ۹۶

منابع انگلیسی ۹۷

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) الف) زمان $t=\varepsilon$ ، ب) زمان $t=L/a$ ۱۰
- شکل (۲-۲) الف) زمان $t=L/a + \varepsilon$ ، ب) زمان $t=2L/a$ ۱۰
- شکل (۳-۲) الف) زمان $t=2L/a + \varepsilon$ ، ب) زمان $t=3L/a$ ۱۰
- شکل (۴-۲) الف) زمان $t=3L/a + \varepsilon$ ، ب) زمان $t=4L/a$ ۱۰
- شکل (۵-۲) تغییرات فشار در زمان، الف) بدون اصطکاک، ب) با در نظر گرفتن اصطکاک ۱۱
- شکل (۱-۳) خطوط مشخصه در صفحه $x-t$ ۲۵
- شکل (۲-۳) وضعیت خطوط مشخصه برای گره ۲۸
- شکل (۳-۳) مرز شبکه پمپاژ موازی در مدل تفاضل محدود ۲۹
- شکل (۴-۳) منحنی مشخصه فشار هد و گشتاور خالص پمپ در حالت غیرماندگار برحسب X و W_H و W_B برای سرعت مشخصه $N_s=24,5$ ۳۱
- شکل (۵-۳) پمپ و شیر کنترل به صورت یک نقطه در i نمایش داده شده است ۳۴
- شکل (۶-۳) خطوط مشخصه برای گره مخزن بالادست ۳۷
- شکل (۷-۳) خطوط مشخصه برای گره پایین دست ۳۸
- شکل (۱-۴) طرح سیستم انتقال آب پمپ دار ۵۰
- شکل (۲-۴) در محل قبل از پمپ (قرمز: کرامت و همکاران، آبی: نتایج مدل سازی عددی) ۵۱
- شکل (۳-۴) فشار در محل بعد از پمپ (قرمز: کرامت و همکاران، آبی: نتایج مدل سازی عددی) ۵۱
- شکل (۴-۴) طرح شماتیک سیستم پمپاژ گروهی a ۵۲
- شکل (۵-۴) نمودار تغییرات هد فشاری در زمان، برای سه حالت مختلف خاموشی ۱، ۲ و ۳ در مکان ۶۰۰ متری از ابتدای خط لوله ۵۳
- شکل (۶-۴) نمودار تغییرات هد فشاری در زمان، برای سه حالت مختلف خاموشی ۱، ۲ و ۳ در مکان ۱۵۰۰ متری از ابتدای خط لوله ۵۴
- شکل (۷-۴) نمودار تغییرات هد فشاری در زمان، برای سه حالت مختلف خاموشی ۱، ۲ و ۳ در مکان ۲۲۵۰ متری از ابتدای خط لوله ۵۴

- شکل (۸-۴) تغییرات هد فشاری در طول لوله در زمان‌های مختلف از جمله قبل از خاموشی پمپ‌ها و S ۰,۵, S ۰,۵, S ۸,۵
- ۱۰, S ۱۵ بعد از خاموشی پمپ‌ها با حالت خاموشی ۱. ۵۵
- شکل (۹-۴) نمودار تغییرات فشار با ترتیب خاموشی حالت ۲ و فاصله زمانی‌های متفاوت در فاصله ۶۰۰ متری از ابتدای خط لوله. ۵۶
- شکل (۱۰-۴) طرح شماتیک سیستم پمپاژ گروهی b, با طرح لوله تغییر یافته. ۵۷
- شکل (۱۱-۴) تغییرات فشار در طول لوله در سیستم پمپاژ گروهی b در زمان‌های مختلف. ۵۷
- شکل (۱۲-۴) تفاوت فشار در طول لوله در دو سیستم پمپاژ a و b, در زمان ۱۵ ثانیه بعد از خاموشی پمپ‌ها. ۵۸
- شکل (۱۳-۴) نمودار تغییرات هد فشاری برای خاموشی سیستم ناهمسان با حالت خاموشی ۱ و ۲ در فاصله ۱۰۰ متری از ابتدای خط لوله. ۵۹
- شکل (۱۴-۴) نمودار تغییرات هد فشاری برای خاموشی سیستم ناهمسان با حالت خاموشی ۱ و ۲ در فاصله ۶۰۰ متری از ابتدای خط لوله. ۶۰
- شکل (۱۵-۴) نمودار تغییرات فاصله زمانی بهینه به تکرار برای سیستم ۱, در هر سه ایستگاه. ۶۲
- شکل (۱۶-۴) نمودار تغییرات ترتیب خاموشی پمپ‌ها به تکرار در سیستم ۱, در هر سه ایستگاه. ۶۳
- شکل (۱۷-۴) تغییرات تابع هدف (ماکزیمم و مینیمم هد فشاری) در تکرار برای سیستم ۱. ۶۴
- شکل (۱۸-۴) تغییرات هد فشاری به زمان در سیستم ۱, در مکان‌های ۱۰۰m, ۶۰۰m, ۱۵۰۰m, ۲۲۵۰m از ابتدای خط لوله. ۶۵
- شکل (۱۹-۴) نمودار تغییرات فاصله زمانی خاموشی بین دو گام در تکرار برای هر سه ایستگاه در سیستم ۲. ۶۵
- شکل (۲۰-۴) نمودار تغییرات ترتیب خاموشی به تکرار در هر سه ایستگاه در سیستم ۲. ۶۶
- شکل (۲۱-۴) نمودار تغییرات تابع هدف به تکرار در سیستم ۲. ۶۶
- شکل (۲۲-۴) نمودار تغییرات هد فشاری به زمان در سیستم ۲, در مکان‌های ۱۰۰m, ۶۰۰m, ۱۵۰۰m, ۲۲۵۰m از ابتدای خط لوله. ۶۷
- شکل (۲۳-۴) نمودار تغییرات فاصله زمانی خاموشی بین دو گام در تکرار برای هر سه ایستگاه در سیستم ۳. ۶۸
- شکل (۲۴-۴) نمودار تغییرات ترتیب خاموشی به تکرار در هر سه ایستگاه در سیستم ۳. ۶۸
- شکل (۲۵-۴) نمودار تغییرات تابع هدف به تکرار در سیستم ۳. ۶۹

- شکل (۴-۲۶) نمودار تغییرات هد فشاری به زمان در سیستم ۳، در مکان‌های ۱۰۰m، ۶۰۰m، ۱۵۰۰m، ۲۲۵۰m از ابتدای خط لوله..... ۶۹
- شکل (۴-۲۷) نمودار تغییرات هد فشاری ماکزیمم و مینیمم با کاهش و افزایش طول لوله‌ها در سیستم ۱..... ۷۱
- شکل (۴-۲۸) نمودار تغییرات هد فشاری ماکزیمم و مینیمم با کاهش و افزایش طول لوله‌ها در سیستم ۲..... ۷۱
- شکل (۴-۲۹) نمودار تغییرات هد فشاری ماکزیمم و مینیمم با کاهش و افزایش طول لوله‌ها در سیستم ۳..... ۷۱
- شکل (۴-۳۰) نمودار تغییرات فشار ماکزیمم کل سیستم انتقال آب با تغییر تعداد ایستگاه‌های پمپاژ..... ۷۴
- شکل (۴-۳۱) نمودار تغییرات فشار مینیمم کل سیستم انتقال آب با تغییر تعداد ایستگاه‌های پمپاژ..... ۷۴
- شکل (۴-۳۲) نمودار تغییرات ترتیب خاموشی به تکرار در هر سه ایستگاه در سیستم ناهمسان..... ۷۶
- شکل (۴-۳۳) نمودار تغییرات تابع هدف به تکرار در سیستم ناهمسان..... ۷۷
- شکل (۴-۳۴) نمودار تغییرات هد فشاری به زمان در سیستم ناهمسان، در مکان‌های ۱۰۰m، ۶۰۰m، ۱۵۰۰m، ۲۲۵۰m از ابتدای خط لوله..... ۷۷
- شکل (۴-۳۵) نمودار تغییرات هد فشاری ماکزیمم و مینیمم با کاهش و افزایش طول لوله‌ها در سیستم ناهمسان..... ۷۹

فهرست جداول

جدول (۱-۳) چهار ناحیه عملکرد پمپ.....	۳۱
جدول (۱-۴) مشخصات سیستم انتقال آب.....	۵۱
جدول (۲-۴) مشخصات یک پمپ در سیستم همسان.....	۵۲
جدول (۳-۴) مشخصات خاموشی حالات مختلف خاموشی پمپ‌های بررسی شده.....	۵۳
جدول (۴-۴) مشخصات پمپ‌های ناهمسان.....	۵۸
جدول (۵-۴) ترتیب خاموشی پمپ‌های ناهمسان در سیستم ۲.....	۵۹
جدول (۶-۴) مشخصات سیستم‌های مورد بررسی در بخش پمپ‌های همسان.....	۶۲
جدول (۷-۴) مشخصات خاموشی بهینه در سیستم‌های بررسی شده در بخش پمپ‌های همسان.....	۷۰
جدول (۸-۴) درصد اختلاف فشار ماکزیمم و مینیمم با ۰,۵ و ۱,۵ برابر طول بررسی شده در بهینه‌سازی برای سیستم‌های ۱,۳ و ۲,۳.....	۷۳
جدول (۹-۴) مشخصات بهینه خاموشی سیستم پمپاژ ناهمسان.....	۷۸
جدول (۱۰-۴) درصد اختلاف فشار ماکزیمم و مینیمم با ۰,۵ و ۱,۵ برابر طول بررسی شده در بهینه‌سازی برای سیستم ناهمسان.....	۷۹

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه

آب یکی از عوامل مهم پیشرفت جوامع بشری به شمار می‌آید و انتقال آن به‌طور صحیح، از لحاظ اقتصادی، حائز اهمیت است. از جمله پدیده‌های مخرب هیدرولیکی که در خطوط انتقال آب رخ می‌دهد، می‌توان به پدیده ضربه قوچ^۱ یا چکش آبی اشاره کرد. ضربه قوچ در سیستم لوله‌های تحت فشار از قبیل سیستم‌های پمپاژ، توربین‌ها و خطوط انتقال آب و نفت به‌صورت امواج فشاری گسترش می‌یابد و بر پایه قوانین فشار، تغییرات دبی یا تغییرات سرعت جریان و شرایط زمانی و مکانی حرکت سیال استوار است. پدیده ضربه قوچ می‌تواند در اثر هر عاملی که منجر به تغییر ناگهانی سرعت می‌شود، ایجاد شود و با موج‌های سریع، زودگذر و میرا همراه است. گاهی اوقات قدرت تخریبی این موج‌های فشاری به حدی است که نتایج وخیمی به بار می‌آورد. ترکیدن خطوط لوله در سیستم‌های انتقال و شبکه‌های توزیع، خرابی و شکسته شدن شیرها، دریچه‌های کنترل و پمپ‌ها و توربین‌ها از نمونه‌های بارز تاثیر این پدیده است. بنابراین بررسی دقیق این پدیده، در کلیه‌ی طرح‌های انتقال آب امری ضروری است تا با شناخت کامل اثرات آن، برای کنترل نتایج سوء این فرآیند تمهیدات لازم اخذ گردد و سیستم انتقال آب از خطرات این پدیده مصون بماند [۱].

از سوی دیگر باید با یک مدیریت صحیح در بهره‌برداری از این خطوط، تا جایی که امکان دارد سعی در کاهش این‌گونه آسیب‌ها نمود. برای رسیدن به این منظور به یک شبیه‌ساز کامل و جامع که قادر به شبیه‌سازی هر خط انتقالی باشد، نیاز است.

بنابر پیچیدگی و گستردگی خطوط انتقال آب و محدودیت‌های ابعاد پمپ، در برخی موارد از چندین پمپ کوچک به‌جای یک پمپ بزرگ استفاده می‌شود. در سیستم‌های بزرگ انتقال آب از چندین ایستگاه پمپاژ به‌صورت سری استفاده می‌شود که هر ایستگاه می‌تواند متشکل از چندین پمپ موازی باشد. از کارافتادن یک و یا چند پمپ در این سیستم پمپاژ باعث نوسانات سرعت و در نتیجه ضربه قوچ می‌شود.

در مطالعات پیشین مشخص گردید که خاموشی گام به گام پمپ‌ها اثر محسوسی در کاهش اثرات مخرب این پدیده دارد [۲]. در این تحقیق با اعمال خاموشی گام به گام بر سیستم پمپاژ آب با شرایط مختلف، سعی شده است که از تجاوز فشارهای ماکزیمم و مینیمم از حد مجاز جلوگیری شود. جزئیات اهداف این تحقیق در بخش بعد بیان شده است.

۱-۲- اهداف و فرضیات پایان‌نامه

در این پژوهش ابتدا سیستم انتقال آب متشکل از چند ایستگاه پمپاژ سری در نظر گرفته شده که هر ایستگاه خود دارای چند پمپ موازی است. به این سیستم انتقال آب پمپ‌دار، خاموشی ناگهانی اعمال شده است. این خاموشی برای کاهش فشارهای ناشی از ضربه قوچ در دو گام رخ می‌دهد [۳]. سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم، فاصله زمانی بهینه‌ی بین دو گام و ترتیب خاموشی پمپ‌ها به نحوی استخراج گردیده که فشار وارد بر سیستم انتقال آب کمینه شود.

معادلات حاکم بر جریان با استفاده از روش خطوط مشخصه^۱ به صورت صریح و معادلات غیرخطی حاکم بر پمپ‌ها با استفاده از روش عددی نیوتن رافسون حل گردیده است.

درواقع هدف اصلی این تحقیق، بررسی ترتیب‌های خاموشی مختلف و فاصله زمانی‌های مختلف خاموشی پمپ‌ها است تا با استفاده از الگوی مناسب، فشار ماکزیمم وارد بر سیستم انتقال آب را به کم‌ترین میزان ممکن و فشار مینیمم سیستم پمپاژ را به حداکثر مقدار برساند. این ترتیب خاموشی و فاصله زمانی بین دو گام، با استفاده از الگوریتم علف‌های هرز مهاجم، به دست آمده است. در نهایت این مساله برای پمپ‌های همسان و ناهمسان و در سیستم‌های مختلف حل گردید و مقایسه‌ای کلی بین سیستم‌ها صورت پذیرفته است و تاثیر افزایش طول لوله‌ها در این بهینه‌سازی بحث شده است.

در مسیر این پایان‌نامه سوالاتی مطرح می‌گردد که در روند مدل‌سازی سعی شده است بدان‌ها پاسخ داده شود:

- فاصله زمانی خاموشی بین دو گام و ترتیب خاموشی پمپ‌ها تا چه حد در فشارهای ماکزیمم و مینیمم وارد بر سیستم انتقال آب موثر هستند؟
 - آیا استفاده از یک الگوریتم بهینه‌ساز می‌تواند در کنترل فشارهای ماکزیمم و مینیمم وارد بر خط انتقال آب موثر باشد؟
 - با افزایش و کاهش طول لوله‌ها و همچنین افزایش و کاهش تعداد ایستگاه‌های پمپاژ، امکان استفاده متغیرهای بهینه‌سازی شده در الگوریتم بهینه‌ساز وجود دارد؟
- در نتایج مدل‌سازی مشاهده گردید دو متغیر فاصله زمانی خاموشی بین دو گام و ترتیب خاموشی پمپ‌ها، می‌توانند سناریوهای بسیار متنوعی تولید کنند و برخی از این سناریوها فشارهای مطلوب و بهینه‌ای به سیستم انتقال وارد می‌کنند. با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم فشارهای ماکزیمم و مینیمم در محدوده مجاز باقی ماند و اثربخشی این الگوریتم بهینه‌ساز در این مساله مشخص گردید. همچنین اثر مساعد کاهش طول لوله و اثر مخرب افزایش طول لوله در این مدل‌سازی استنتاج گردید.

۱-۳- فصل‌بندی پایان‌نامه

در فصل حاضر، مقدماتی در مورد ضربه قوچ و نحوه ایجاد آن در خطوط انتقال، پمپ و عملکرد آن در شرایط مختلف از جمله خاموشی ناگهانی پمپ و اهمیت خطوط انتقال آب و بهینه‌سازی آن بیان شده است. همچنین اهداف تحقیق نیز به اختصار بیان شده است.

در فصل دوم به بررسی تاریخچه مطالعات انجام‌شده پیرامون ضربه قوچ پرداخته شده است، همچنین مطالعات پیشین در زمینه ضربه قوچ در پمپ‌ها و جریان غیر ماندگار ناشی از، ازکارافتادن پمپ بررسی شده و مروری بر پژوهش‌های مرتبط با بهینه‌سازی در این حیطة صورت پذیرفته است.

در فصل سوم معادلات و روابط حاکم بر تحقیق در دو بخش کلی موردبررسی قرار خواهد گرفت. در بخش اول معادلات و روابط مربوط به مدل‌سازی سیستم پمپاژ گروهی که شامل معادلات هیدرولیک جریان و معادلات حاکم بر پمپ‌های موازی است، بررسی می‌شود و روش حل عددی آن بیان خواهد

شد است. در بخش دوم این فصل، به شرح الگوریتم بهینه‌ساز و شیوه عملکرد آن پرداخته می‌شود و توابع هدف، متغیرهای بهینه شده و جزئیات فرمولاسیون این الگوریتم بررسی شده است.

در فصل چهارم ابتدا مدل شبیه‌ساز خط انتقال آب با مدل آزمایشگاهی کرامت و همکاران [۴] راستی‌آزمایی می‌شود. سپس در بخش اول چند نمونه از تغییرات هد فشاری با تغییر الگوی خاموشی و فاصله زمانی بین دوگام در یک سیستم پمپاژ معین ارائه شده است. سپس به بررسی نتایج حاصل از بهینه‌سازی این مدل شبیه‌ساز پرداخته خواهد شد و نمودارها و جزئیات متغیر و توابع هدف بهینه‌شده بحث شده است. هم‌چنین تاثیر افزایش طول لوله‌ها در نتایج بهینه‌سازی شده بررسی گردیده است.

در فصل نهایی، ابتدا آن‌چه در فصل‌های گذشته انجام شده به‌طور خلاصه بیان می‌شود. سپس نتیجه‌گیری‌های کلی و اساسی به‌اختصار و جداگانه، ارائه می‌شود. درنهایت پیشنهاداتی در راستای این پایان‌نامه، برای گسترش مباحث مربوط به این حوزه مطرح می‌گردد.

فصل دوم: مبانی،
تاریخچه و مطالعات
پیشین

۲-۱- مبانی

در فصل دوم ابتدا مقدمات و مبانی ضربه قوچ و نحوه عملکرد آن در خط لوله شرح داده خواهد شد. همچنین شرح مختصری بر الگوریتم‌های بهینه‌ساز و پمپ‌ها ارائه خواهد شد.

۲-۱-۱- بررسی فیزیکی پدیده ضربه قوچ

جریانی که خصوصیات آن (دبی، فشار، سرعت و ...) با گذشت زمان تغییر کند، جریان غیرماندگار^۱ نامیده می‌شود. جریان در لوله‌های انتقال آب می‌تواند ماندگار^۲ یا غیرماندگار باشد. جریان غیرماندگاری که بین دو جریان ماندگار رخ می‌دهد، جریان میرا یا گذرا^۳ نامیده می‌شود. ضربه قوچ نیز یک جریان گذرا است که در اثر تغییر سرعت، بین دو جریان ماندگار رخ می‌دهد. عواملی از جمله بسته شدن سریع شیر، راه‌اندازی یا از کار افتادن پمپ یا توربین، شکست مکانیکی هر یک از اجزا مانند شیر در اثر استهلاک و فرسودگی و هر عاملی که منجر به از کار افتادن ناگهانی پمپ شود از جمله قطع ناگهانی برق و قفل شدن یاتاقان‌های پمپ، عامل ایجاد ضربه قوچ است. برای درک بهتر، ضربه قوچ در یک مخزن با هد ثابت در بالادست و یک لوله و شیر در پایین‌دست بررسی شده است. لوله‌ها در این مثال الاستیک هستند به طوری که با افزایش فشار داخلی، لوله منبسط می‌شود و با کاهش فشار داخلی، لوله منقبض می‌شود. جریان در لوله قبل از بسته شدن شیر در زمان $t = 0$ ماندگار است. اگر سیستم بدون اصطکاک فرض شود، H_0 هد فشار در حالت ماندگار اولیه در طول لوله است. جهت x و سرعت V به سمت پایین‌دست مثبت در نظر گرفته شده است.

سیکل بعد از بسته شدن شیر را می‌توان به چهار بخش تقسیم کرد:

-
- 1- Unsteady
 - 2- Steady
 - 3- Transient flow

$$0 < t \leq L/a \quad ۱.$$

به محض بسته شدن شیر سرعت جریان در محل شیر صفر می شود که باعث افزایش فشار در محل شیر به مقدار $\Delta H = (a/g)V_0$ می شود. به خاطر این افزایش فشار لوله منبسط می شود. سیال تحت این فشار مثبت فشرده می شود. اگر a سرعت موج فشاری و L طول لوله باشد، در نتیجه موج در زمان $t = L/a$ به مخزن می رسد. در این بازه زمانی، لوله منبسط شده، سرعت جریان صفر و هد فشار برابر $H_0 + \Delta H$ می شود (شکل (۲-۱)).

$$L/a < t \leq 2L/a \quad ۲.$$

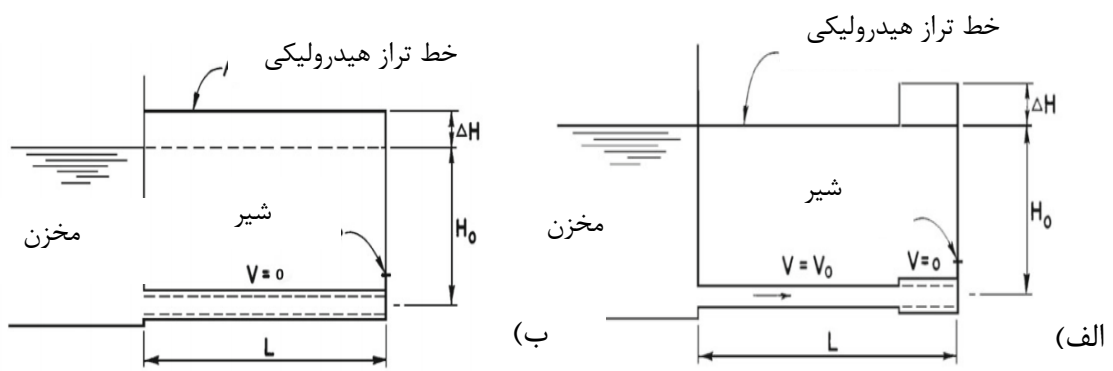
در لحظه ای که موج به مخزن می رسد هد مخزن برابر H_0 است در حالی که هد فشار در مجاورت این نقطه در لوله برابر $H_0 + \Delta H$ است. به خاطر این اختلاف فشار، سیال با سرعت $-V_0$ از لوله به سمت مخزن جریان پیدا می کند. بنابراین سرعت در ورودی لوله از مقدار صفر به مقدار $-V_0$ کاهش می یابد. این باعث می شود فشار از $H_0 + \Delta H$ به مقدار H_0 کاهش یابد و یک موج منفی به سمت شیر حرکت کند (شکل (۲-۲)).

$$2L/a < t \leq 3L/a \quad ۳.$$

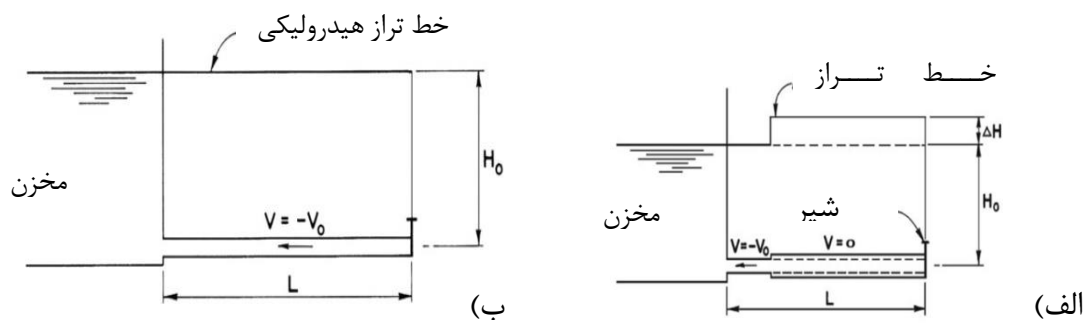
مادامی که شیر بسته است، نمی توان سرعت در محل شیر را منفی نگه داشت. بنابراین، سرعت به طور متناوب در این ناحیه، از $-V_0$ به صفر و فشار به $H_0 - \Delta H$ تغییر پیدا می کند و یک موج پیش رونده منفی به سمت مخزن به راه می افتد (شکل (۲-۳)).

$$3L/a < t \leq 4L/a \quad ۴.$$

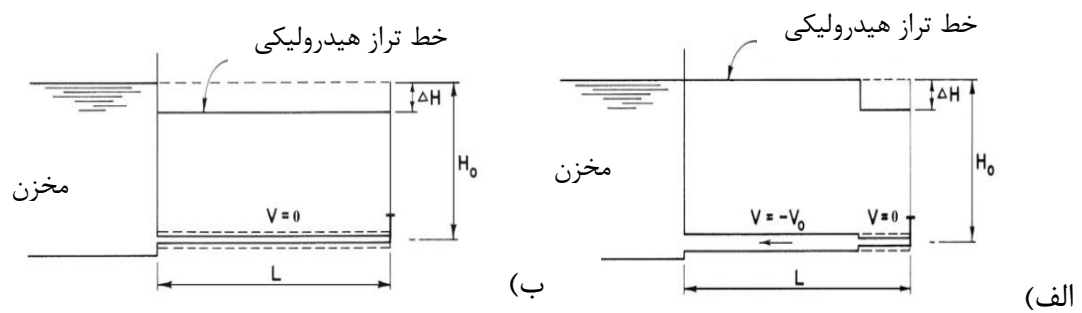
با رسیدن این موج منفی به مخزن، شرایطی نامتعادل در بالادست لوله شکل می گیرد. اکنون فشار در مخزن در مجاورت لوله بیشتر از فشار در مقطعی از لوله در مجاورت مخزن است. در نتیجه سیال با سرعت V_0 در لوله جریان می یابد و هد فشار به مقدار H_0 افزایش می یابد (شکل (۲-۴)).



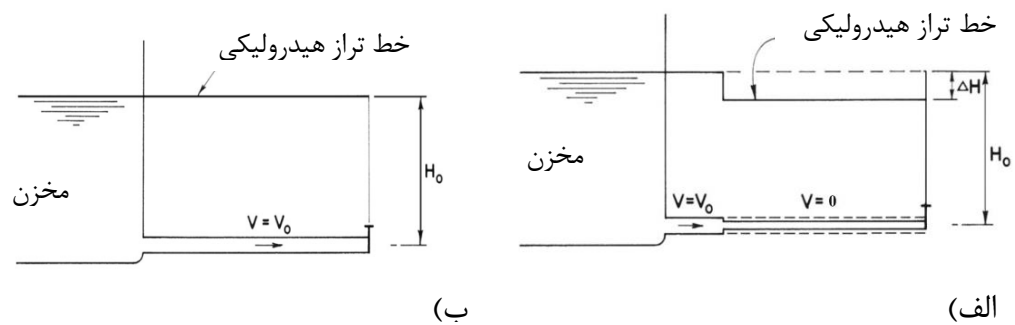
شکل (۱-۲) (الف) زمان $t = \varepsilon$ ، (ب) زمان $t = L/a$.



شکل (۲-۲) (الف) زمان $t = L/a + \varepsilon$ ، (ب) زمان $t = 2L/a$.

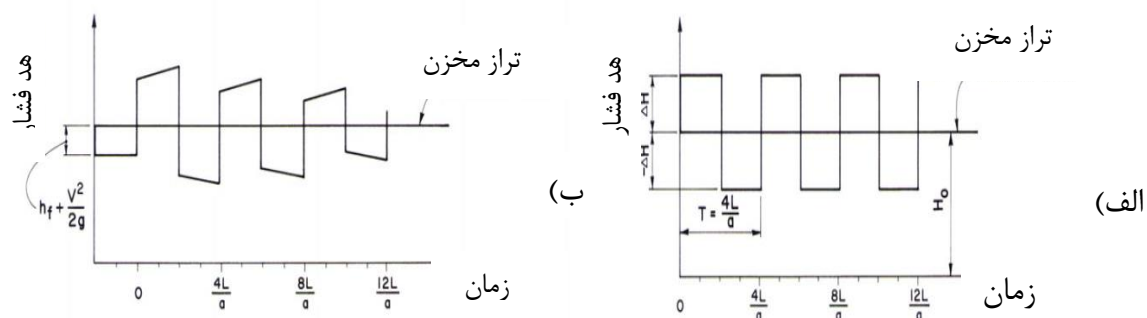


شکل (۳-۲) (الف) زمان $t = 2L/a + \varepsilon$ ، (ب) زمان $t = 3L/a$.



شکل (۴-۲) (الف) زمان $t = 3L/a + \varepsilon$ ، (ب) زمان $t = 4L/a$.

در صورت وجود اصطکاک با هر بار تکرار، مقداری از هد فشار کاسته می‌شود تا به حالت ماندگار برسد (شکل (۵-۲)).



شکل (۵-۲) تغییرات فشار در زمان، الف) بدون اصطکاک، ب) با در نظر گرفتن اصطکاک.

۲-۱-۲- پمپ‌ها

پمپ به ماشینی گفته می‌شود که انرژی مکانیکی را از یک منبع خارجی گرفته و به سیالی که از آن عبور می‌کند، انتقال می‌دهد. در نتیجه، انرژی سیال پس از خروج از این پمپ افزایش می‌یابد. در پمپ‌ها تغییرات انرژی سیال همواره به صورت تغییر فشار سیال مشاهده می‌گردد. پمپ‌ها را می‌توان از نظر کارکرد و سیستم عملکرد به ۷ دسته تناوبی^۱، گریز از مرکز^۲، توربینی^۳، دورانی^۴، ملخی^۵، شناور^۶ و لجن کش و فاضلاب^۷ تقسیم‌بندی نمود. در سیستم‌های آبرسانی دو نوع پمپ تناوبی و گریز از مرکز (سانتریفیوژ) استفاده می‌شود که امروزه با تکامل پمپ‌های سانتریفیوژ، پمپ‌های تناوبی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این رو در این تحقیق برای بررسی حالت‌های مختلف خاموشی از پمپ سانتریفیوژ استفاده شده است.

-
- 1- Reciprocating Pump
 - 2- Centrifugal Pump
 - 3- Turbine Pump
 - 4- Rotary Pump
 - 5- Propeller Pump
 - 6- Deep-well Pump
 - 7- Sump Pump

۲-۱-۳- عملکرد پمپ‌ها

در عملکردهای معمول پمپ از قبیل شروع به کار پمپ، خاموشی پمپ و قطع برق پمپ و ... حالت گذرایی ایجاد می‌شود. در طی شروع کار یک پمپ، شیر خروجی به‌منظور کاهش بار الکتریکی موتور پمپ بسته می‌ماند و با رسیدن سرعت پمپ به‌سرعت شاخص، شیر به‌تدریج باز می‌شود. با این حال اگر شیر تخلیه وجود نداشته باشد، سرعت دورانی موتور پمپ به‌آهستگی افزایش می‌یابد. به‌طور مشابه، برای یک خاموشی معمول پمپ، شیر تخلیه ابتدا به‌آهستگی بسته می‌شود یا سرعت موتور به‌آهستگی کم می‌شود و در نهایت منبع نیرو موتور پمپ خاموش می‌شود. بنابراین هر دو شرایط روشن و خاموش شدن پمپ از قبل برنامه‌ریزی شده است و بر اساس نیاز، با افزایش زمان عملکرد، شدت جریان گذرا قابل کنترل است.

۲-۱-۴- عملکرد پمپ‌ها در قطع ناگهانی برق

جریان گذرا ناشی از، قطع ناگهانی برق موتور پمپ، معمولاً شدید است و خطوط لوله برای تحمل فشار ماکزیمم و مینیمم ناشی از آن طراحی می‌شوند. در قطع ناگهانی برق، سرعت پمپ کاهش می‌یابد درحالی‌که اینرسی پمپ در مقایسه با اینرسی سیال موجود در خط تخلیه معمولاً کوچک است. به خاطر کاهش جریان و هد پمپ در انتهای پمپ، امواج فشاری منفی به سمت پایین‌دست در مسیر تخلیه پیش می‌روند و امواج فشاری مثبت به سمت بالادست در مسیر مکش حرکت می‌کنند. سرعت جریان در خط تخلیه به صفر می‌رسد و سپس جریان در پمپ معکوس می‌شود درحالی‌که، تا زمانی که دریچه پمپ مانع از ورود این جریان به پمپ شود، پمپ همچنان در جهت نرمال در حال دوران است. زمانی که یک پمپ با جریان معکوس در جهت نرمال در حال گردش است، گفته می‌شود که پمپ در ناحیه استهلاک انرژی عمل می‌کند. به خاطر جریان معکوس، سرعت پمپ سریعاً به صفر می‌رسد و سپس منفی می‌شود. پمپ اکنون در خلاف جهت اولیه در چرخش است؛ به‌عنوان مثال مانند یک توربین عمل

می‌کند. سرعت پمپ معکوس تا زمانی که به سرعت فرار^۱ برسد افزایش می‌یابد این زمانی اتفاق می‌افتد که هد موجود با افت هد در پمپ برابر شود. با افزایش سرعت معکوس، جریان معکوس داخل پمپ در اثر انسداد کاهش می‌یابد که منجر به یک فشار مثبت در مسیر تخلیه و فشار منفی در مسیر مکش می‌شود.

بسته به مشخصات لوله، خط تراز هیدرولیکی در جریان گذرا ممکن است به ناحیه‌ای پایین‌تر از تراز لوله سقوط کند و فشار داخل لوله کمتر از فشار هوا شود. اگر فشار کمتر از فشار بخار آب شود، ممکن است باعث جدایی ستون مایع^۲ در آن ناحیه از لوله شود. وقتی دو ستون مایع جدا، مجدداً به هم می‌پیوندند فشار بیش از اندازه‌ای تولید می‌شود. در طول طراحی امکان جدایی ستون مایع باید مورد بررسی قرار گیرد و در صورت لزوم تجهیزات حفاظت کننده برای جلوگیری از جدایی ستون مایع، فراهم شوند.

۲-۱-۵- الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی

الگوریتم‌های تکاملی^۳ روش‌های جستجو تصادفی هستند که تکامل بیولوژیکی طبیعی و/یا رفتار اجتماعی گونه‌ها را تقلید می‌کنند [۵]. نمونه‌هایی از این موارد عبارت‌اند از: چگونه مورچه‌ها خود را از کوتاه‌ترین مسیر به منبع غذا می‌رسانند و چگونه پرندگان مقصد خود را در طی مهاجرت پیدا می‌کنند. اخیراً توجه زیادی به استفاده از الگوریتم‌های الهام گرفته از فرآیندهای طبیعی برای حل مسائل بهینه‌سازی شده است. برای مثال، الگوریتم ژنتیک^۴ که در سال ۱۹۷۵ معرفی شده بود، اکنون به یک ابزار بهینه‌سازی استاندارد در مهندسی تبدیل شده است. الگوریتم‌های مختلف دیگری از جمله؛ کلونی مورچه‌ها^۵، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده^۶، بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۷، الگوریتم جستجوی ممنوعه^۸ و

-
- 1- Runaway speed
 - 1- Column separation
 - 2- Evolutionary algorithms
 - 3- Genetic algorithms
 - 4- Ant colony optimization
 - 5- Simulated annealing
 - 6- Particle swarm optimization
 - 7- Tabu search

الگوریتم علف‌های هرز مهاجم^۱ نیز معرفی شده‌اند[۶]. به‌طور کلی، الگوریتم‌های فراکاوشی رویکردی مشابه در حل مسائل دارند.

۲-۲- تاریخچه ضربه قوچ

در این بخش در زمینه ضربه قوچ در پمپ‌ها، در سیستم لوله‌های الاستیک و ویسکوالاستیک و بهینه‌یابی پمپ‌ها به‌صورت منفرد و در سیستم‌های گروهی به بررسی برخی از مطالعات انجام‌شده و نتایج حاصل از آن می‌پردازیم.

مطالعه هیدرولیک جریان‌های میرا از قرن ۱۷ میلادی با تحقیق درباره‌ی نحوه انتشار امواج صوتی در هوا و انتشار امواج در آب‌های کم‌عمق شروع شد. نیوتن^۲ و لاگرانژ^۳ نخستین کسانی بودند که در این زمینه به مطالعه پرداختند. مونژ^۴ در سال ۱۷۸۹ روش ترسیمی برای انتگرال‌گیری از معادلات دیفرانسیل جزئی ارائه کرد و آن را روش خطوط مشخصه نامید. هولم‌هلتز^۵ اولین کسی بود که دریافت، سرعت امواج فشاری در آب داخل لوله کمتر از سرعت موج در آب‌های آزاد است. وبر^۶ در سال ۱۸۶۶ جریان سیال در لوله‌های کشسان را مورد مطالعه قرار داد و آزمایشاتی در جهت تعیین سرعت امواج فشاری انجام داد. وی هم‌چنین معادلات اندازه حرکت و پیوستگی را که اساس مطالعات جریان‌های غیرماندگار هستند را ارائه کرد. ماری^۷ در سال ۱۸۷۵ نیز آزمایش‌های متعددی برای تعیین سرعت موج فشاری در آب و جیوه انجام داد و دریافت که سرعت موج مستقل از دامنه امواج فشاری است و سرعت موج فشاری در جیوه سه برابر آن در آب است هم‌چنین دریافت که سرعت موج فشاری با الاستیسیته لوله متناسب است. کورت‌ویچ^۸ در سال ۱۸۷۸ اولین کسی بود که سرعت موج را با توجه به کشسان بودن جدار لوله و کشسانی سیال به‌دست آورد، مطالعات قبلی فقط یکی از موارد کشسان بودن جدار لوله یا کشسانی سیال

8- Invasive Weed Optimization

- 1- Newton
- 3- Lagrange
- 3- Monge
- 5- Helmholtz
- 6- Weber
- 7- Marey
- 8- Kortwege

را در نظر می‌گرفتند. گرومیکا^۱ برای اولین بار افت‌های اصطکاکی را به هنگام تحلیل ضربه قوچ مدنظر قرار داد. وی فرض کرد که سیال غیرقابل تراکم است و افت‌های اصطکاکی با سرعت رابطه مستقیم دارند. ژوکوفسکی^۲ در سال ۱۹۸۷ بر اساس مطالعات نظری و آزمایشگاهی که انجام داد، گزارشی در مورد تئوری اساسی ضربه قوچ منتشر نمود. او رابطه‌ای جهت سرعت انتشار موج فشاری به‌دست آورد که در آن کشسان بودن سیال و جدار لوله در نظر گرفته شده بود. همچنین او با استفاده از معادلات پیوستگی و اندازه حرکت، رابطه‌ای مابین کاهش سرعت و افزایش فشار ناشی از آن به‌دست آورد. وی همچنین تحقیقاتی درباره اثرات سرعت بسته شدن یک شیر انجام داد و دریافت که افزایش فشار در لوله به زمان بسته شدن شیر ارتباط دارد. آلیوی^۳ در سال ۱۹۰۲ تئوری عمومی ضربه قوچ خود را منتشر کرد. معادله اندازه حرکتی که او به‌دست آورد از آن‌چه کورت‌وگ به‌دست آورده بود، دقت بیشتری داشت. گیبسون^۴ در سال ۱۹۱۹ براساس تئوری ژوکوفسکی رساله‌ای را ارائه کرد که برای اولین بار در تحلیل جریان، افت‌های اصطکاکی به‌صورت غیرخطی در نظر گرفته شده بودند. لووی^۵ در سال ۱۹۲۸ روش ترسیمی مشابه وود ارائه کرد و مسأله تشدید حاصل از عملکرد تناوبی شیرها و همچنین کاهش فشار ناشی از باز شدن آهسته شیرها را مورد بررسی قرار داد. وی در تحلیل خود تلفات اصطکاکی را با اضافه کردن جمله مربوط به اصطکاک در معادلات دیفرانسیل جزئی در نظر گرفت. برگرون^۶ روش ترسیمی را برای تعیین شرایط در مقاطع میانی خط لوله بسط و گسترش داد. وی اولین کسی بود که در تحلیل ترسیمی خود تلفات اصطکاکی را در نظر گرفت. راس^۷ در سال ۱۹۶۶ اولین شخصی بود که روشی برای تعیین مراحل بسته شدن شیر ارائه کرد که روش بسته شدن بهینه شیر نامیده شد. چادری^۸ و حسینی^۹ در سال ۱۹۸۵

-
- 1- Gromeka
 - 2- Joukowski
 - 3- Allievi
 - 4- Gibson
 - 5- Lowy
 - 6- Bergeron
 - 7- Ruus
 - 8- Chauhdry
 - 9- Hussaini

معادلات ضربه قوچ را با روش‌های تفاضل محدود صریح مک‌کورماک^۱، لامبدا^۲ و گابوتی^۳ حل کردند و دریافتند که این روش‌های مرتبه دوم تفاضل محدود جواب‌های بهتری نسبت به روش خطوط مشخصه می‌دهد [۷]. وود^۴ در سال ۲۰۰۵ به مطالعه و بررسی ضربه قوچ، عوامل موثر بر آن و معادلات حاکم پرداخت. وی از دو روش خطوط مشخصه و مشخصه‌ی موج برای شبیه‌سازی شبکه‌های آب استفاده کرد. او با مقایسه دو روش نشان داد که نتایج به‌دست آمده بسیار مشابه هستند در حالی که جواب‌ها با دقت‌های مشابه، در دروس مشخصه موج در مدت اجرای کمتر و تعداد محاسبات کمتری حاصل می‌شوند [۸]. در این روش برخلاف روش خطوط مشخصه، تعداد محاسبات در هر گام زمانی با افزایش دقت تغییر نمی‌کند.

۲-۳- جریان غیرماندگار ناشی از خاموشی سیستم‌های پمپاژ

پدیده ضربه قوچ به‌دلیل افت و افزایش فشار، نیروی زیادی را به جریان و دیواره لوله اعمال می‌کند که ازجمله اثرات آن ترکیدگی لوله، خرابی و شکست شیرها و خرابی دریچه‌های کنترل و پمپ‌ها است. تاکنون مطالعات آزمایشگاهی و تئوری بسیاری روی این پدیده صورت گرفته است ولی در بیشتر این بررسی‌ها از مطالعه و بهینه‌سازی گروه پمپ‌ها، که امروزه در سیستم‌های بزرگ استفاده می‌شود، غافل بوده‌اند، درحالی‌که طراحی و جانمایی پمپ‌ها برای عملکرد ایمن و اقتصادی در شبکه‌های پمپ از اهمیت بالایی برخوردار است.

چادری در سال ۲۰۱۴ و وایلی^۵ و همکاران در سال ۱۹۹۳ با استفاده از روابط پمپ‌های هم‌خانواده روش مدل‌سازی عملکرد پمپ را در جریان غیرماندگار ناشی از توقف ناگهانی و شروع به کار آن به‌خوبی بیان کردند [۹]، [۱۰]. هم‌چنین ترولی^۶ در سال ۱۹۶۹ به بررسی عملکرد ایمن سیستم‌ها پرداخت [۱۱].

1- MacCormack
2- Lambda
3- Gabutti
4- Wood
5- Wylie
6- Thorley

برگانت^۱ و همکاران در سال‌ها ۱۹۹۹ و ۲۰۰۶ و کرامت و همکاران در ۲۰۰۹ جدایی ستون مایع را در اثر ضربه قوچ ناشی از خاموشی پمپ و انواع حالت‌های ممکن مورد بررسی قرار دادند [۴]، [۱۲]، [۱۳]. احمدی و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی اثر ارتعاشات پمپ بر روی هیدرولیک جریان و به‌طور کلی تداخل سیال-سازه ناشی از پمپ پرداخته‌اند [۱۴]. گیونت^۲ در سال ۲۰۰۲ با استفاده از روش گدونو با دقت‌های مرتبه اول و دوم بر اساس بسط سری تیلور به بررسی ضربه قوچ پرداخت [۱۵]. وی دریافت که دقت مرتبه اول جواب‌هایی بسیار نزدیک به روش خطوط مشخصه دارد. سپهران و همکاران در سال ۲۰۱۲ با استفاده از روش تفاضل محدود ضمنی با شبکه‌ی غیرممتقارن به بررسی ضربه قوچ پرداختند و نتایج به‌دست‌آمده را با داده‌های آزمایشگاهی و همچنین نتایج حاصل‌شده از روش خطوط مشخصه مقایسه کردند [۱۶]. افشار و محجوبی در سال ۲۰۰۷ به بررسی طراحی بهینه سیستم انتقال پمپ‌دار برای کاهش فشارهای ناشی از توقف پمپ پرداختند [۱۷]. آن‌ها نشان دادند که با افزایش قطر لوله‌ها، اثرات توقف ناگهانی پمپ، به‌ویژه مقدار فشار منفی ایجادشده و جدایی ستون مایع ناشی از آن کاهش می‌یابد. کوزینت^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۳ با بررسی عملکرد پمپ در نرم‌افزار آنسیس^۴ نشان دادند که عملکرد پمپ با سرعت‌های ویژه آن مرتبط است و در سرعت‌های ویژه بالا عملکرد آن با سرعت‌های ویژه پایین متفاوت است [۱۸]. سوارز^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۸ به مدل‌سازی مخزن ضربه‌گیر برای سیستم پمپاژ مشخص با استفاده از معادلات کلاسیک ضربه قوچ و حل آن با روش خطوط مشخصه پرداختند و نتایج دبی و فشار در حالت غیرماندگار را نشان دادند و همچنین در حالت مدل‌سازی اصطکاک ماندگار و غیرماندگار را مقایسه نمودند [۱۹]. همچنین سوارز در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۳ به تحلیل میرایی در جریان غیر ماندگار ناشی از به‌کار افتادن سیستم پمپاژ پرداختند و نشان دادند که مدل‌سازی اصطکاک به‌صورت غیرماندگار در این شرایط جواب‌های دقیق‌تری به‌دست می‌دهد [۲۰]. پارسا‌صدر و همکاران در

1- Bergant

2- Guinot

1- Couzinet

۴- ANSYS

5- Soares

خاموشی سیستم پمپاژ گروهی سری و موازی را در دو گام بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با خاموشی پمپ‌ها در دو گام فشار وارد بر سیستم پمپاژ به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد و همچنین با جایگزینی تعدادی پمپ ضعیف به‌جای یک پمپ قوی فشار ناشی از ضربه قوچ به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۲].

۲-۴- مروری بر منابع بهینه‌سازی

محرابیان و همکاران در سال ۲۰۰۶ الگوریتم بهینه‌سازی جدیدی را مبتنی بر کلونی علف‌های هرز مهاجم پیشنهاد دادند. در این پژوهش امکان‌سنجی، بازدهی و اثربخشی الگوریتم علف‌های هرز مهاجم با بررسی چند تابع تحقیق‌شده است و همچنین این الگوریتم با الگوریتم‌های ژنتیک، الگوریتم ممتیک، بهینه‌ساز ازدحام ذرات و الگوریتم بهینه‌ساز جهش قورباغه مقایسه شده است. محققان دریافتند که الگوریتم علف‌های هرز مهاجم می‌تواند به مقدار بهینه کلی^۱ توابع موردبررسی دست یابد و در مقایسه با سایر الگوریتم‌های موردبررسی، سرعت بیشتری نیز دارد [۶]. وینویس^۲ در سال ۲۰۱۰ الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های مهاجم را در مسائل باینری بررسی کرد. وی نشان داد که این الگوریتم و الگوریتم ازدحام ذرات، مسائل باینری را با دقت یکسانی حل می‌کنند [۲۱]. لینگردی^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۰ طرح بهینه‌سازی مخزن موج‌گیر را با یک سری محدودیت‌های فشاری تحت عنوان بهینه‌سازی مقید حالت غیرماندگار با روش‌های عمومی بهینه‌سازی مثل الگوریتم ژنتیک ارائه دادند که شروع کار بهینه‌سازی مقید در جریان غیرماندگار لوله‌ها با روش فوق به شمار می‌آمد [۲۲]. جانگ^۴ و کارنی^۵ در سال ۲۰۰۶ از مدل‌های الگوریتم ژنتیک و بهینه‌ساز ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی خطوط انتقال آب و کاهش خسارات ناشی از ضربه قوچ استفاده کردند. آن‌ها با تعیین موقعیت بهینه تجهیزات کنترل سیستم انتقال آب و همچنین انتخاب قطر، جنس و ضخامت مناسب برای لوله‌ها به توابع هدف سیستم که عبارت بودند از

1- Global Optimum

2-veenhuis

3-Lingiredy

4-Jung

5-Karney

حداقل کردن فشار مثبت، حداکثر نمودن فشار منفی و حداقل کردن اختلاف میان حداقل و حداکثر بار موجود در سیستم خط لوله، دست پیدا کردند. در نهایت مدل الگوریتم ژنتیک نسبت به ازدحام ذرات نتایج بهتری داد [۲۳]. تیان^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۸ ضربه قوچ ناشی از خاموشی یک پمپ و به کار افتادن پمپ دوم با در نظر گرفتن سرعت روشن شدن پمپ‌ها، در دو پمپ موازی، با روش خطوط مشخصه بررسی و بهینه‌یابی کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که مشخصات ضربه قوچ در حالت شروع به کار پمپ با سرعت زیاد با حالت شروع به کار پمپ با سرعت کم کاملاً متفاوت است و بیشترین تغییرات فشار در حالت شروع به کار و ازکارافتادن با سرعت زیاد رخ می‌دهد. همچنین محققان برای کم کردن فشار بحرانی، از یک فنر میراگر در پشت دریچه استفاده کردند [۲۴].

با توجه به عملکرد خوب روش خطوط مشخصه و دقت این روش در حل مسائل ضربه قوچ، معادلات حاکم بر جریان با این روش نیمه‌تحلیلی حل خواهند شد، همچنین معادلات حاکم بر پمپ‌ها با استفاده از روش عددی نیوتن رافسون حل خواهند شد. نظر به مزایای الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم در سرعت و دقت آن در دستیابی به مینیمم و ماکزیمم‌های کلی توابع، در تحقیق حاضر از این الگوریتم فراکاوشی در بهینه‌سازی فشارهای ماکزیمم و مینیمم وارد بر سیستم انتقال آب استفاده خواهد شد.

فصل سوم: مدل ریاضی

و روش حل عددی

۳-۱- ضربه قوچ و معادلات حاکم

در این بخش معادلات حاکم بر ضربه قوچ که در مدل شبیه‌ساز حل خواهند شد را به اختصار بیان خواهیم کرد. هم‌چنین روش حل این معادلات به اختصار شرح داده می‌شود.

برای بررسی پدیده ضربه قوچ در اثر خاموشی پمپ، معادلات هیدرولیکی جریان (معادله پیوستگی و معادله اندازه حرکت) و معادلات حاکم بر پمپ‌ها مواجه هستیم. به دلیل دقت و پایداری روش خطوط مشخصه، در حل معادلات هیدرولیکی از این روش استفاده شده است [۲۵].

برای بررسی جریان با این شرایط از تئوری ضربه قوچ کلاسیک استفاده می‌شود. در این تئوری برای بررسی جریان غیرماندگار و به‌دست آوردن معادلات ضربه قوچ فرضیه‌های زیر در نظر گرفته شده است [۲۶].

- حرکت سیال در خط لوله به‌صورت یک‌بعدی است.
- توزیع سرعت در هر مقطع به‌صورت یکنواخت و با سرعت متوسط فرض می‌شود.
- افت‌های اصطکاکی در حالت جریان غیرماندگار، برابر افت‌های اصطکاکی در جریان ماندگار در نظر گرفته شده است.
- لوله پر است و در خلال جریان پر باقی می‌ماند.
- در جریان غیرماندگار، جدایی ستون مایع رخ نمی‌دهد و فشار سیال همواره از فشار بخار سیال بزرگ‌تر است.
- گازهای آزاد درون سیال آن‌قدر کوچک‌اند که سرعت موج را می‌توان به‌صورت ثابت در نظر گرفت.
- جدار لوله و سیال به‌صورت الاستیک، خطی فرض می‌شود.

۳-۱-۱- معادلات حاکم بر هیدرولیک جریان

معادلات حاکم بر هیدرولیک جریان در پدیده ضربه قوچ، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت هستند. برای جریان آبی که داخل لوله در حال حرکت است، تحت هر شرایطی این معادلات همواره برقرار هستند. معادلات توصیف کننده جریان های گذرا با فرضیات تراکم پذیری سیال و الاستیک خطی بودن دیواره های لوله، بر حسب متغیرهای وابسته $V(x,t)$ و فشار $H(x,t)$ و دو متغیر مستقل مکان در لوله (x) و زمان (t) به صورت زیر است:

$$V \frac{\partial H}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (۱-۳)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + v \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H}{\partial x} + g \sin \theta + J_q = 0 \quad (۲-۳)$$

$$a^2 = \frac{K/\rho}{1 + \frac{KD}{E \times e}} \quad (۳-۳)$$

که در آن a سرعت موج فشاری، K مدول بالک، E مدول الاستیسیته لوله، e ضخامت لوله، g شتاب ثقل، ρ چگالی سیال، θ زاویه لوله نسبت به افق، V سرعت سیال، D قطر لوله و J اصطکاک جداره لوله است.

در معادلات پیوستگی و اندازه حرکت (به ترتیب معادلات (۱-۳) و (۲-۳))، جملات غیرخطی $V \frac{\partial H}{\partial x}$ و $V \frac{\partial V}{\partial x}$ در مقایسه با سایر جملات کوچک تر و قابل صرف نظر کردن هستند.

برای مدل سازی اصطکاک از اصطکاک شبه پایدار داری وایسباخ استفاده می شود. برای به دست آوردن اصطکاک شبه پایدار داری وایسباخ، فرض می شود که پروفیل سرعت در حالت جریان غیرماندگار در مقایسه با پروفیل سرعت در حالت جریان ماندگار با همان سرعت متوسط، تغییری نمی کند. مدل اصطکاکی به صورت رابطه (۴-۳) تعریف می شود [۲۷].

$$J_q = \frac{f}{D} \frac{V|V|}{2} \quad (۴-۳)$$

که در آن f ضریب دارسی وایسباخ است که مقدار آن را می‌توان برحسب عدد رینولدز و ضریب زبری نسبی $(\frac{\epsilon}{D})$ از دیاگرام مودی به‌دست آورد.

۳-۱-۲- حل عددی معادلات هیدرولیک جریان با روش MOC

هدف نهایی حل معادله پیوستگی و اندازه حرکت است، پس معادلات دیفرانسیل (۳-۱) و (۳-۲) را به دو یا چند معادله دیفرانسیل ساده‌تری تبدیل کنیم که قابلیت حل تحلیلی داشته باشند. بدین منظور پارامتر دلخواه λ را در نظر گرفته و با استفاده از آن ترکیبی خطی از دو معادله L_1 و L_2 می‌سازیم. سپس با دادن مقداری دلخواه به پارامتر دلخواه λ ، معادله دیفرانسیل دیگری که ترکیبی از معادله L_1 و L_2 است، به‌دست می‌آید. بدین منظور به صورت زیر عمل می‌کنیم.

$$L_1 + \lambda L_2 = 0 \Rightarrow \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{C^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \lambda \left(g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + f \frac{V|V|}{2D} \right) = 0 \quad (۵-۳)$$

بامرتب کردن رابطه‌ی (۵-۳) و مساوی قرار دادن ضرایب $\frac{\partial V}{\partial x}$ ، $\frac{\partial H}{\partial x}$ دو مقدار برای λ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$\lambda = \frac{C}{g} \rightarrow \frac{\partial H}{\partial t} + C \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{C}{g} \left(C \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + \frac{f C V |V|}{2gD} = 0 \quad (۶-۳)$$

$$\lambda = -\frac{C}{g} \rightarrow \frac{\partial H}{\partial t} - C \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{C}{g} \left(-C \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + \frac{f C V |V|}{2gD} = 0 \quad (۷-۳)$$

دو معادله (۶-۳) و (۷-۳) بدون شک هم‌ارز معادلات (۳-۱) و (۳-۲) هستند. معادلات (۶-۳) و (۷-۳) همان معادلات ضربه قوچ هستند. این معادلات نیز هم‌چنان به‌سادگی قابل انتگرال‌گیری نیستند. با نگاه به معادله (۷-۳) درمی‌یابیم که اگر $C = \frac{dx}{dt}$ باشد، این معادله به یک معادله دیفرانسیل کامل تبدیل می‌شود که به‌راحتی قابل انتگرال‌گیری است. می‌دانیم که:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{dH}{dt} \quad , \quad \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{dV}{dt} \quad (۸-۳)$$

در روش تفاضل محدود ابتدا باید شبکه‌ای بنا کنیم تا مقادیر مجهولات را بتوانیم روی گره‌های شبکه به صورت گسسته شده درآوریم. شبکه‌ای که در تفاضل محدود بنا می‌شود، یک شبکه کاملاً دلخواه بوده و تنها در صفحه گره‌هایی ایجاد می‌کردیم تا بتوانیم معادلات را گسسته‌سازی کنیم. اما در این جا باید گره‌ها (مجهولات) را روی شبکه‌ای در نظر بگیریم که بین Δx ، Δt آن رابطه $\frac{dx}{dt} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = C$ حاکم باشد. در نتیجه در این مساله نمی‌توان نقاط را در یک فضای $x-t$ دلخواه پخش کرد و بینشان رابطه برقرار بلکه باید حتماً نقاط را روی دسته خطوطی که عبارت دیفرانسیلی $\frac{dx}{dt} = C$ تولید می‌کند، گستراند. هم‌چنین در معادله (۷-۳) مشاهده می‌شود که اگر $C = -\frac{dx}{dt}$ باشد، این معادله نیز یک معادله کامل خواهد شد و به این ترتیب با رعایت در نظر گرفتن گره‌ها روی $\frac{\Delta x}{\Delta t} = -C$ می‌توان گسسته‌سازی را برای معادله دیفرانسیلی کاملی که حاصل می‌شود انجام داد.

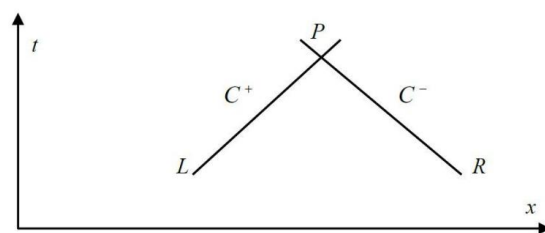
با توجه به مطالب گفته‌شده می‌توان نوشت:

$$C = \frac{dx}{dt} \Rightarrow \frac{dH}{dt} + \frac{C}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{fCQ|Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (۹-۳)$$

$$C = -\frac{dx}{dt} \Rightarrow \frac{dH}{dt} - \frac{C}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{fCQ|Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (۱۰-۳)$$

حال معادله (۹-۳) را روی خط C^+ ($\frac{dx}{dt} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = C$) گسسته‌سازی می‌کنیم. (به شکل (۱-۳) توجه

شود)



شکل (۱-۳) خطوط مشخصه در صفحه $x-t$.

$$\frac{H_P - H_L}{\Delta t} + \frac{C}{gA} \frac{Q_P - Q_L}{\Delta t} + \frac{fCQ_L|Q_L|}{2gDA^2} = 0 \Rightarrow \quad (۱۱-۳)$$

$$H_P = H_L - \frac{C}{gA} (Q_P - Q_L) - \frac{fC\Delta t Q_L|Q_L|}{2gDA^2}$$

ثابت‌های $B = \frac{C}{gA}$ ، $R = \frac{fC\Delta t}{2gDA^2}$ را برای ساده‌سازی معرفی شده‌اند. همچنین از آنجایی که $\Delta x = C \Delta t$ ، $R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2}$ می‌شود و معادله (۱۱-۳) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$\begin{aligned} H_P &= C_P - BQ_P \\ , \quad C_P &= H_L + BQ_L - RQ_L|Q_L| \\ , \quad B &= \frac{C}{gA} \quad , \quad R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \end{aligned} \quad (۱۲-۳)$$

به همین ترتیب از گسسته‌سازی معادله (۱۰-۳) روی خط C^- $\left(\frac{dx}{dt} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = C\right)$ روابط (۱۳-۳) تا (۱۴-۳) به دست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} \frac{H_P - H_L}{\Delta t} - \frac{C}{gA} \frac{Q_P - Q_R}{\Delta t} + \frac{fCQ_R|Q_R|}{2gDA^2} &= 0 \Rightarrow \\ H_P &= H_R + \frac{C}{gA}(Q_P - Q_R) - \frac{f\Delta x Q_R|Q_R|}{2gDA^2} \end{aligned} \quad (۱۳-۳)$$

$$\begin{aligned} H_P &= C_m - BQ_P \\ , \quad C_m &= H_R + BQ_R - RQ_R|Q_R| \\ , \quad B &= \frac{C}{gA} \quad , \quad R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \end{aligned} \quad (۱۴-۳)$$

معادلات به دست آمده در (۱۲-۳) و (۱۴-۳) که به ترتیب مربوط به گسسته‌سازی روی خطوط C^+ ، C^- می‌باشد را می‌توان به صورت هم‌زمان حل کرد. در این دو معادله مجهولات H_P ، Q_P می‌باشند که پس از حل هم‌زمان معادلات مذکور، برحسب Q_L, Q_R, H_L, H_R به دست خواهند آمد.

$$\begin{aligned} \begin{cases} H_P = C_P - BQ_P \\ H_P = C_m - BQ_P \end{cases} &\Rightarrow H_P = \frac{C_P + C_m}{2} , \\ Q_P &= \frac{C_P - C_m}{2B} \\ , \quad C_P &= H_L + BQ_L - RQ_L|Q_L| \\ , \quad C_m &= H_R + BQ_R - RQ_R|Q_R| \\ , \quad B &= \frac{C}{gA} \quad , \quad R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \end{aligned} \quad (۱۵-۳)$$

برای افزایش دقت محاسبه اثر اصطکاک، استریتز پیشنهاد کرده که به جای $Q_R|Q_R|$ از $Q_P|Q_R|$ استفاده شود. همچنین به جای $Q_L|Q_L|$ از $Q_P|Q_L|$ استفاده شود. بدیهی است که برای داشتن یک دقت

بیشتر، بهتر بود گسسته‌سازی این جمله به صورت غیرصریح^۱ (در زمان آینده) انجام شود یعنی بنویسیم $Q_P|Q_P|$ اما Q_P مجهول می‌باشد این کار باعث می‌شود که برای هر گره یک دستگاه دو معادله دو مجهول غیرخطی داشته باشیم اما استفاده از $Q_P|Q_R|$ در رابطه با C^- و $Q_P|Q_L|$ در خط C^+ باعث می‌شود که بدون این که دستگاهی غیرخطی از Q_P ، H_P ایجاد شود، دقت نسبت به حالت کاملاً صریح^۲ افزایش پیدا می‌کند.

حال با اعمال این تغییر، حل معادلات (۹-۳) و (۱۰-۳) را دوباره به صورت زیر دنبال می‌کنیم. برای گسسته‌سازی معادله (۱۰-۳) روی خط C^+ داریم:

$$\begin{aligned} H_P &= C_P - B_P Q_P, \\ C_P &= H_L + B Q_L, \quad B_P = B + R|Q_L| \\ B &= \frac{C}{gA}, \quad R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \end{aligned} \quad (۱۶-۳)$$

هم‌چنین برای گسسته‌سازی معادله (۱۰-۳) روی خط C^- به‌طور مشابه خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} H_P &= C_m + B_m Q_P \\ C_m &= H_R + B Q_R, \quad B_m = B + R|Q_R| \\ B &= \frac{C}{gA}, \quad R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \end{aligned} \quad (۱۷-۳)$$

به این ترتیب مشاهده می‌شود در معادلات (۱۶-۳) و (۱۷-۳) که شامل دو مجهول Q_P و H_P می‌باشند به دست آمده است. در این جا نیز با حل هم‌زمان این دو معادله، مجهولات Q_P و H_P بر حسب Q_L, Q_R, H_L, H_R به دست خواهند آمد.

$$\begin{cases} H_P = C_P - B_P Q_P \\ H_P = C_m + B_m Q_P \end{cases} \Rightarrow H_P = \frac{\frac{C_P}{B_P} + \frac{C_m}{B_m}}{\frac{1}{B_P} + \frac{1}{B_m}},$$

$$Q_P = \frac{C_P - C_m}{B_P + B_m}$$

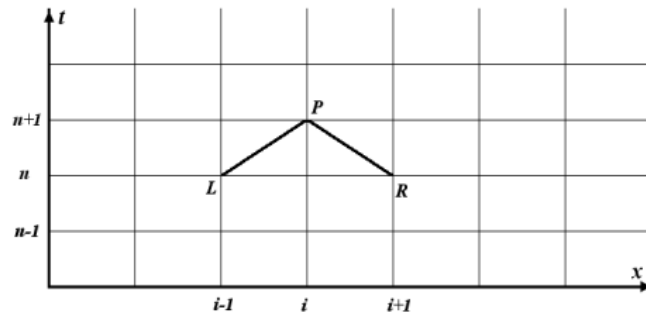
^۱ Implicit

^۲ fully Explicit

$$\begin{aligned}
& , \quad C_p = H_L + BQ_L \quad , \quad B_p = B + R|Q_L| \\
& , \quad C_m = H_R + BQ_R \quad , \quad B_m = B + R|Q_R| \\
& , \quad B = \frac{C}{gA} \quad , \quad R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2}
\end{aligned}
\tag{۱۸-۳}$$

با توجه به این که استفاده از روابط (۱۸-۳) دقت بیشتری در محاسبه اثر اصطکاک دارد، در نرم افزار نیز از این روش استفاده شده است. می توان مشاهده کرد که اگر از اثر اصطکاک صرف نظر شود ($f = 0$)، هر دو فرمول (۱۸-۳) و (۱۵-۳) جواب های یکسانی خواهند داشت.

برای این که بتوان از فرمول های به دست آمده برای برنامه نویسی کامپیوتری استفاده کرد مطابق شکل (۲-۳) به جای اندیس های P, R, L از اندیس های i, n استفاده می شود. به طوری که نشان دهنده شماره گرهی است که مجهول می باشد و رابطه برای آن نوشته می شود (اندیس مکانی)؛ و n اندیس مربوط به گام زمانی می باشد، (اندیس زمانی). اندیس n ، مربوط به زمان حال، $n+1$ مربوط به زمان آینده و $n-1$ مربوط به گام زمانی گذشته است.



شکل (۲-۳) وضعیت خطوط مشخصه برای گره.

با توجه به اندیس های معرفی شده می توان رابطه (۱۸-۳) را به صورت زیر برای برنامه نویسی مورد استفاده قرارداد. (به جای اندیس P مربوط به دبی و Q از اندیس های i و $n+1$ استفاده می شود. همچنین به جای L ، از اندیس های $i-1$ و n و به جای R از اندیس های $i+1$ و n استفاده خواهد شد.)

$$\begin{cases} H_i^{n+1} = C_i - B_P Q_i^{n+1} \\ H_i^{n+1} = C_m + B_m Q_i^{n+1} \end{cases} \Rightarrow H_i^{n+1} = \frac{\frac{C_P}{B_P} + \frac{C_m}{B_m}}{\frac{1}{B_P} + \frac{1}{B_m}},$$

$$Q_i^{n+1} = \frac{C_P - C_m}{B_P + B_m} \quad (۱۹-۳)$$

$$, \quad C_P = H_{i-1}^n + B Q_{i-1}^n, \quad B_P = B + R|Q_{i-1}^n|$$

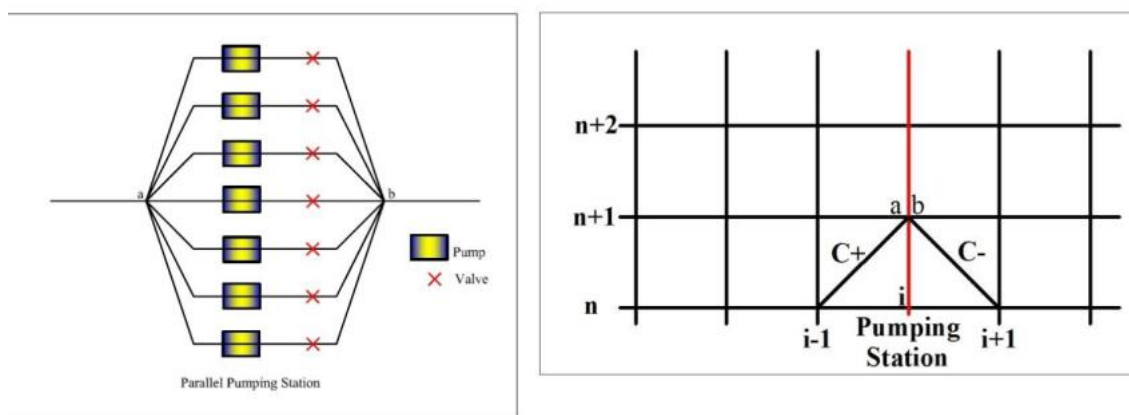
$$, \quad C_m = H_{i+1}^n + B Q_{i+1}^n, \quad B_m = B + R|Q_{i+1}^n|$$

$$, \quad B = \frac{C}{gA}, \quad R = \frac{f \Delta x}{2gDA^2}$$

۳-۱-۳- معادلات حاکم بر پمپ‌های موازی

در سیستم‌های پمپاژ از پمپ‌های موازی به منظور تامین دبی استفاده می‌شود. در سیستم پمپاژ موازی دبی کل هر ایستگاه برابر با مجموع دبی تک تک پمپ‌ها است ($Q_{\text{Station}} = Q_1 + Q_2 + \dots$) ولی در این حالت هد کلی ایستگاه ثابت بوده ($H_{\text{Station}} = H_1 = H_2 = \dots$) و به تعداد پمپ‌ها بستگی ندارد. معادلات حاکم بر پمپ‌های موازی شامل معادلات هد و معادلات تغییر سرعت (گشتاور) است.

در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی به روش تفاضل محدود مطابق شکل (۳-۳) برای گروه پمپ موازی، قبل و بعد از هر یک از متعلقات سیستم پمپاژ، یک گره در نظر گرفته می‌شود و سپس برای مدل‌سازی سیستم لوله‌کشی، گروه پمپ با تمام متعلقات آن به صورت یک نقطه در نظر گرفته شده است که مشخصات این نقطه در هر زمان از نتایج گروه پمپ به دست می‌آید.



شکل (۳-۳) مرز شبکه پمپاژ موازی در مدل تفاضل محدود.

۱-۳-۱-۳- منحنی مشخصه پمپ

دو فرض اساسی برای مدل سازی جریان غیرماندگار ناشی از توقف ناگهانی پمپ انجام می شود. ابتدا این که منحنی های مشخصه پمپ در حالت جریان ماندگار برای جریان غیرماندگار نیز معتبر است و دیگر این که روابط همولوگ^۱ مربوط به پمپ همواره صادق است [۱۰]. برای تعیین شرایط مرزی پمپ ها باید رابطه ای میان دبی پمپ Q و ارتفاع نظیر انرژی فشاری پمپ H داشته باشیم. دبی پمپ های سانتریفیوژ وابسته به سرعت دورانی پره های پمپ N و اختلاف ارتفاع معادل فشار در دو سر پمپ H است. تغییرات سرعت دورانی پره پمپ در جریان غیرماندگار وابسته به گشتاور خالص T و ممان اینرسی قسمت چرخنده و سیال در حال گردش است. جهت نمایش ریاضی یک پمپ در حالت غیرماندگار باید چهار پارامتر Q, H, N, T در لحظه مشخص باشد. منحنی هایی نشان دهنده ی رابطه ی میان این متغیرها، منحنی های مشخصه یا عملکرد پمپ نامیده می شود. این منحنی ها بر اساس روابط پمپ های هم خانواده و استفاده از پارامترهای بی بعد ارائه گردیده اند که بتوان از آن ها برای پمپ های مختلف بهره گرفت. معمولاً پمپ های هم خانواده از یک نوع هستند و یک منحنی مشخصه برای آن خانواده رسم می شود ولی در اکثر حالات، برای رسم منحنی مشخصه به کمک سرعت ویژه، پمپ ها را دسته بندی می کند.

به زمانی که مقادیر Q, H, N, T دارای بیشترین راندمان باشند، حالت شاخص گفته می شود و با اندیس R مشخص می شوند. با استفاده از این مقادیر، ۴ پارامتر بی بعد همولوگ در رابطه (۳-۲۰) معرفی می شود:

$$\vartheta = \frac{Q}{Q_R}; \quad h = \frac{H}{H_R}; \quad \alpha = \frac{N}{N_R}; \quad \beta = \frac{T}{T_R}; \quad (۳-۲۰)$$

منحنی های مشخصه را با توجه به علامت دو پارامتر (α, ϑ) (جهت چرخش پره پمپ و جهت حرکت جریان در لوله) در چهار ناحیه معکوس، نرمال، استهلاک و توربینی رسم می کنند [۹]. این چهار ناحیه در جدول (۳-۱) ارائه شده است.

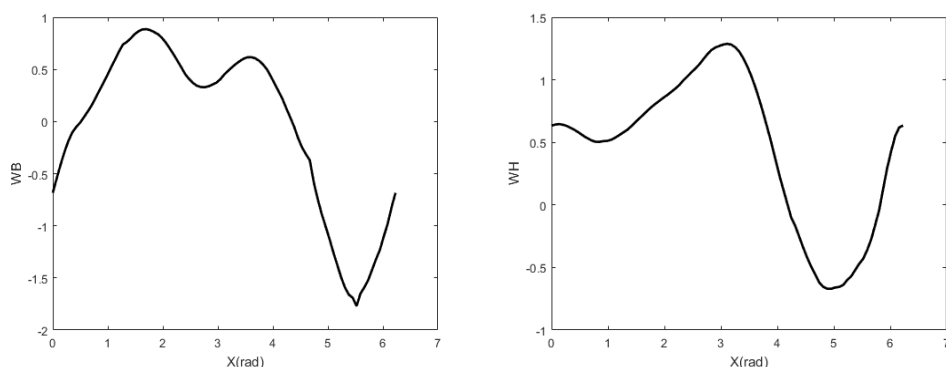
جدول (۱-۳) چهار ناحیه عملکرد پمپ.

ناحیه معکوس	ناحیه نرمال	ناحیه استهلاک	ناحیه توربینی
$\vartheta > 0$	$\vartheta \geq 0$	$\vartheta < 0$	$\vartheta \leq 0$
$\alpha < 0$	$\alpha \geq 0$	$\alpha \geq 0$	$\alpha < 0$

منحنی‌های مشخصه پمپ در محور افقی برحسب $x = \pi + \tan^{-1} \frac{\vartheta}{\alpha}$ و در محور عمودی یکی برحسب $W_B = \frac{\beta}{\alpha^2 + \vartheta^2}$ و $W_H = \frac{h}{\alpha^2 + \vartheta^2}$ است. از آن‌ها به ترتیب جهت تعیین هد و گشتاور استفاده شده است. این منحنی‌ها برای مقادیر مختلف سرعت‌های ویژه N_S ، طبق فرمول (۲۱-۳)، ترسیم شده‌اند.

$$N_S = \frac{N_R Q_R^{0.5}}{H_R^{0.75}} \quad (۲۱-۳)$$

منحنی مشخصه برای سرعت ویژه ۲۴,۵ در شکل (۴-۳) ارائه شده است.



شکل (۴-۳) منحنی مشخصه فشار هد و گشتاور خالص پمپ در حالت غیرماندگار برحسب X و W_H و W_B برای سرعت مشخصه $N_S = ۲۴,۵$.

۳-۱-۲- معادله تعادل هد در ایستگاه پمپاژ موازی

معادله تعادل هد را می‌توان در حالت ماندگار و غیرماندگار موردبررسی قرار دارد. در حالت ماندگار چون پمپ با سرعت دورانی معمول کار می‌کند سرعت دورانی پره‌ی آن برابر حالت شاخص است ($\alpha_i = 1$) پس هد حاصل از پمپ i ام (H_{pi}) با توجه به پارامتر بی‌بعد ϑ_i به‌دست می‌آید ($i = 1, 2, \dots, n$) و n تعداد کل پمپ‌ها است). ولی در حالت غیرماندگار چون سرعت چرخش پره‌ی پمپ نسبت به زمان تغییر

می‌کند برای به‌دست آوردن مشخصات جریان در این نقطه (مرز پمپ) نیاز به معادلات تغییر سرعت پمپ‌ها است.

به ازای هر پمپ از سیستم پمپاژ موازی، یک معادله‌ی تعادل هد وجود دارد. اگر H_a و H_b به ترتیب هد قبل و بعد از سیستم پمپاژ باشند معادله‌ی تعادل هد برای سیستم پمپاژ موازی در هر زمانی به صورت زیر است:

$$H_a + H_{p_i} - h_{f_i} - H_b = 0 \quad (22-3)$$

که h_{f_i} تلفات هد ناشی از اصطکاک شیر بعد از پمپ i ام و H_{p_i} هد پمپ i ام است. برای حل جریان غیرماندگار ناشی از توقف ناگهانی از معادلات C^+ و C^- به ترتیب برای نقاط a و b استفاده می‌شود. در نهایت معادله تعادل هد برای پمپ i ام در حالت غیرماندگار به صورت زیر ساده می‌شود $[10]$:

$$FH = (C_p - C_m) - Q_{Station} \cdot (B_p + B_m) + W_H(x_i) \cdot H_{R_i} \cdot (\alpha_i^2 + \vartheta_i^2) \quad (23-3)$$

$$C_p = H_{i-1}^n + BQ_{i-1}^n; \quad B_p = B + R|Q_{i-1}^n|; \quad (24-3)$$

$$C_m = H_{i+1}^n + BQ_{i+1}^n; \quad B_m = B + R|Q_{i+1}^n|; \quad (25-3)$$

اندیس i در روابط (22-3) و (26-3) شماره پمپ و در روابط (27-3) و (28-3) محل پمپ را در شبکه مستطیلی نشان می‌دهد.

مقادیر دبی، سرعت دورانی پره پمپ، هد و گشتاور هر پمپ در هر گام زمانی با استفاده از روابط مذکور محاسبه می‌شوند.

$$FH = (C_p - C_m) - Q_{Station} \cdot (B_p + B_m) + W_H(x_i) \cdot H_{R_i} \cdot (\alpha_i^2 + \vartheta_i^2) \quad (26-3)$$

$$C_p = H_{i-1}^n + BQ_{i-1}^n; \quad B_p = B + R|Q_{i-1}^n|; \quad (27-3)$$

$$C_m = H_{i+1}^n + BQ_{i+1}^n; \quad B_m = B + R|Q_{i+1}^n|; \quad (28-3)$$

اندیس i در روابط (22-3) و (26-3) شماره پمپ و در روابط (27-3) و (28-3) محل پمپ را در شبکه مستطیلی نشان می‌دهد.

۳-۳-۱-۳- معادله تعادل تغییر سرعت در ایستگاه پمپاژ موازی

تغییر سرعت دورانی پره پمپ، به وجود گشتاور نامتعادل وابسته است لذا به ازای هر پمپ یک معادله ایجاد می‌شود [۱۰]:

$$T = -I \frac{d\omega}{dt} = -I \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (29-3)$$

که I ممان اینرسی قسمت چرخنده که شامل پمپ و سیال درون آن است. N و ω به ترتیب سرعت دورانی بر حسب دور بر دقیقه و رادیان بر ثانیه می‌باشد. بر اساس روابط (۲۰-۳) و (۲۹-۳) داریم:

$$\beta = -I \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{N_R}{T_R} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \quad (30-3)$$

با استفاده از رابطه‌ی (۳۰-۳) و تبدیل رابطه (۲۹-۳) به صورت تفاضل محدود، معادله‌ی تغییر سرعت (گشتاور) برای پمپ i ام به صورت زیر می‌شود:

$$\beta + \beta_0 - I \frac{N_R}{T_R} \cdot \frac{\pi}{15 \cdot \Delta t} \cdot (\alpha_{i_0} - \alpha_i) = 0 \quad (31-3)$$

اندیس صفر در α_{i_0} و β_0 نشان‌دهنده‌ی مقادیر آن‌ها در گام زمانی قبل می‌باشد.

معادله فوق در نهایت برای هر یک از پمپ‌های سیستم پمپاژ موازی (در این جا پمپ i ام) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$FT_i = (\alpha_i^2 + \vartheta_i^2) \cdot WB(x_i) + \beta_{i_0} + I_i \frac{N_{R_i}}{T_{R_i}} \cdot \frac{\pi}{30 \cdot \Delta t} \cdot (\alpha_i - \alpha_{i_0}) = 0 \quad (32-3)$$

$$x_i = \pi + \tan^{-1}\left(\frac{\vartheta_i}{\alpha_i}\right) \quad (33-3)$$

برای حل هم‌زمان دستگاه معادلات غیرخطی (۲۶-۳) و (۳۲-۳) (که در کل به تعداد 2n معادله غیرخطی هستند) از روش عددی نیوتن رافسون با دقت چهار رقم اعشار استفاده شده است. پس از حل هم‌زمان دستگاه معادلات غیرخطی مذکور مقادیر $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ و $\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_n$ (n تعداد کل پمپ می‌باشد) در هر گام زمانی به دست می‌آیند. با استفاده از روابط زیر می‌توان مشخصات جریان در هر یک از پمپ‌ها را محاسبه نمود:

$$Q_{Station} = \sum_{i=1}^n \vartheta_i \cdot Q_{R_i} \quad (34-3)$$

$$N_i = \alpha_i \cdot N_R \quad (35-3)$$

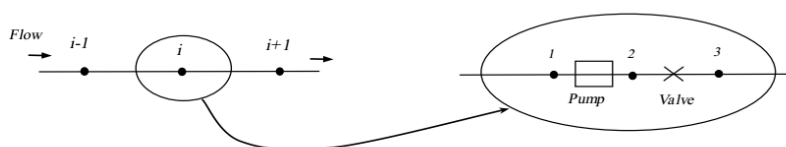
$$H_{P_i} = (\alpha_i^2 + \vartheta_i^2) \cdot W_H(x_i) \cdot H_{R_i} \quad (36-3)$$

$$T_{P_i} = (\alpha_i^2 + \vartheta_i^2) \cdot W_B(x_i) \cdot T_{R_i} \quad (37-3)$$

تغییر سرعت دورانی پره پمپ، به وجود گشتاور نامتعادل وابسته است لذا به ازای هر پمپ یک معادله ایجاد می شود [۶].

۳-۱-۴- حل معادلات حاکم بر پمپ ها

جهت ارائه یک شرایط مرزی مناسب برای سیستم دارای پمپ، مطابق شکل (۵-۳) بخشی از یک خط لوله متشکل از پمپ و شیر کنترل آن و گره قبل و بعد از آن نشان داده شده اند. شیر کنترل که معمولاً پس از پمپ نصب می شود به گونه ای است که می توان الگوی خاصی جهت نحوه بسته شدن آن مشخص نمود بدون این که این الگو متأثر از نوسانات فشار قبل و بعد از آن باشد. بنابراین می توان فرض کرد که میزان بسته بودن شیر در هر زمان، τ به صورت تابعی مشخص داده شده است.



شکل (۵-۳) پمپ و شیر کنترل به صورت یک نقطه در $\dot{I}$ نمایش داده شده است.

دو فرض اساسی جهت مدل سازی جریان گذرا ناشی از یک پمپ انجام می شود. اول این که مشخصه های پمپ در حالت جریان ماندگار برای جریان غیرماندگار نیز معتبر می باشد و دیگر این که روابط همولوگ مربوط به پمپ همواره صادق هستند.

از رابطه ی (۳۸-۳) که با استفاده از برون یابی خطی استخراج شده است می توان جهت تعیین هد با استفاده از منحنی های داده شده استفاده کرد.

$$\frac{h}{\alpha^2 + \nu^2} = A_0 + A_1 x, \quad x = \pi + \tan^{-1}\left(\frac{\nu}{\alpha}\right) \quad (38-3)$$

در این روابط A_0 و A_1 ثابت‌هایی هستند که در اولویت تکرار درون گام زمانی، با استفاده از مقادیر به‌دست‌آمده برای α و ν در گام زمانی قبل و منحنی‌های مشخصه پمپ که به صورت دو بردار داده می‌شوند به‌دست می‌آیند [۴]، [۱۰].

جهت مدل‌سازی جریان گذرا به دنبال خاموش شدن پمپ با توجه به شکل (۳-۵) به جز دو رابطه‌ی C^+ و C^- می‌توان یک رابطه تعادل هد برای پمپ بین نقاط ۱ و ۲ و یک رابطه اوریفیس برای شیر بین نقاط ۲ و ۳ به‌صورت زیر نوشت.

$$H_1 + hH_R = H_2 \quad (39-3)$$

$$H_2 - \frac{Q|Q|}{2C_V} = H_3, \quad C_V = \frac{Q_R^2 \tau^2}{2\Delta H_0} \quad (40-3)$$

که در آن‌ها ΔH_0 افت هد در شیر در حالت جریان ماندگار (با دبی Q_0 و $\tau = 1$) است. چنانچه برای h از (۳۸-۳) درون (۳۹-۳) جایگزین شود و H_2 بین (۳۹-۳) و (۴۰-۳) حذف شود و برای H_2 و H_1 از روابط C^+ و C^- ، مناسبی که به‌ترتیب برای نقاط ۱ و ۳ شکل (۳-۵) نوشته می‌شوند استفاده شود، رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$F_H = C_P - C_m - \nu Q_R(B_P + B_m) + H_R(\alpha^2 + \nu^2)(A_0 + A_1 x) - \frac{\nu|\nu|\Delta H_0}{\tau^2} \quad (41-3)$$

هم‌چنین معادله دیفرانسیل زیر بین گشتاور اعمال‌شده T و سرعت دورانی پمپ ω رابطه برقرار می‌کند.

$$T = -I_{pump} \frac{d\omega}{dt}, \quad \omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (42-3)$$

این رابطه باید به‌صورت انتگرال‌گیری عددی حل شود زیرا T تابعی از زمان است و بسته به دبی جریان تغییر می‌کند. چنانچه این رابطه با استفاده از قاعده دوزنقه در انتگرال‌گیری عددی از زمان t_0 الی t_1 نوشته شود خواهیم داشت.

$$\frac{1}{2}(T(t_0) + T(t_1))(t_1 - t_0) = -I_{pump} \frac{2\pi}{60}(N(t_1) - N(t_0)) \quad (43-3)$$

چنانچه این رابطه بر اساس کمیت‌های بی‌بعد برای یک شبکه خطوط مشخصه یک‌درمیان^۱ نوشته شود و چنانچه اندیس صفر نشانگر مقادیر حاصله از گام زمانی قبل باشند خواهیم داشت.

$$\beta + \beta_0 - \frac{\pi N_R I_{pump}}{30 T_R \Delta t} (\alpha_0 - \alpha) = 0 \quad (44-3)$$

اکنون همانند رابطه (۳۸-۳) می‌توان گشتاور را استفاده از برون‌یابی از منحنی‌های مشخصه پمپ به‌صورت رابطه زیر به‌دست آورد.

$$\frac{\beta}{\alpha^2 + \nu^2} = B_0 + B_1 x, \quad x = \pi + \tan^{-1}\left(\frac{\nu}{\alpha}\right) \quad (45-3)$$

چنانچه از رابطه فوق β محاسبه شود و درون رابطه (۴۴-۳) جایگزین شود رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} (\alpha^2 + \nu^2)[B_0 + B_1 x] + \beta_0 - C_T(\alpha_0 - \alpha) &= 0, \\ C_T &= I_{pump} \frac{N_R}{T_R} \frac{\pi}{30 \Delta t}, \quad \beta_0 = \frac{T_0}{T_R}, \\ x &= \pi + \tan^{-1}\left(\frac{\nu}{\alpha}\right) \end{aligned} \quad (46-3)$$

به‌طور خلاصه الگوریتم حل در هر گام زمانی به این صورت است که با استفاده از دو معادله (۴۱-۳) و (۴۶-۳) دو مجهول α و ν تعیین می‌شوند اما چون پارامترهای B_1, B_0, A_1, A_0 باید بر اساس این دو مجهول تعیین شود باید پس از به‌دست آوردن این دو مجهول ثابت‌های مذکور اصلاح شوند و سپس دو معادله مذکور با استفاده از ثابت‌های اصلاح‌شده جهت تعیین α و ν بار دیگر حل شوند. این روند تا همگرایی دو مجهول تکرار می‌شود.

قابل‌ذکر است که در صورت وجود جریان پایدار مقدار α برابر واحد خواهد بود زیرا تا زمانی که پمپ روشن است سرعت دورانی پمپ برابر همان چیزی است که توسط کارخانه برای پمپ داده‌شده است و شرایط سیستم لوله و تجهیزات موجود در آن نمی‌تواند باعث تغییر آن شود. در این شرایط چنانچه سیستم لوله به‌گونه‌ای باشد که در حالت جریان پایدار مقدار ν نیز برابر واحد گردد در آن صورت گفته می‌شود که پمپ در شرایط حداکثر کارایی^۲ در حال کار است.

^۱ Staggerd grid

^۲ Rated situation

با گذر زمان پس از خاموش شدن پمپ، سرعت چرخش پره‌های پمپ به تدریج کاهش می‌یابد که سرانجام منجر به ایجاد فشار یکسانی در دو طرف پمپ می‌گردد. پس از آن پره‌های پمپ شروع به دوران به صورت معکوس (عملکرد پمپ در ناحیه توربینی) می‌نمایند.

۳-۱-۴-۱ شرایط مرزی مخزن بالادست

در یک شبکه لوله، مخزن به گرهی گفته می‌شود که همواره دارای هد ثابتی باشند. بدیهی است که مقدار این هد ثابت، یکی از پارامترهای عمده‌ای است که در مقدار جوابی که برای H و Q تمام گره‌های شبکه در نهایت به دست خواهد آمد، تاثیر گذار خواهد بود.

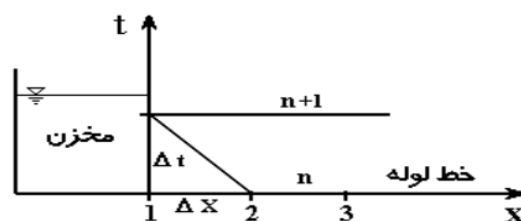
در این حالت، مطابق شکل (۳-۶)، در محل مخزن تنها می‌توان معادله C^- را نوشت. ولی چون ارتفاع سیال در مخزن ثابت است، مقدار H در محل مخزن همواره مساوی است با:

$$H_i^{n+1} = H_i^n = H_{res} \quad (۳-۴۷)$$

که H_{res} هد مخزن است. بنابراین در معادله C^- تنها مجهول، Q_i^{n+1} خواهد بود.

$$C^-: H_i^{n+1} = C_m + B_m Q_i^{n+1} \Rightarrow Q_i^{n+1} = \frac{H_{res} - C_m}{B_m} \quad (۳-۴۸)$$

که پارامترهای C_m و B_m قبلاً در روابط (۳-۱۹) معرفی شده‌اند. می‌دانیم که برای محاسبه این مقادیر از H و Q محاسبه شده در گام زمانی N استفاده می‌شود.



شکل (۳-۶) خطوط مشخصه برای گره مخزن بالادست.

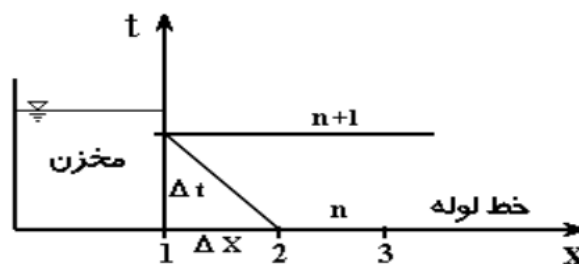
۳-۴-۲- شرایط مرزی مخزن پایین دست

در برخی از شبکه‌های انتقال، علاوه بر مخزن بالادست، مخزن پایین دست نیز می‌تواند وجود داشته باشد که تفاوت عمده بین این دو در گره‌ای است که سیال در حالت جریان ماندگار خود، از آن خارج می‌شود و مخزن پایین دست گره‌ای است که سیال به آن وارد می‌شود.

محاسبه گره‌های مخزن پایین دست مشابه حالت قبل است، تنها تفاوت در این است که برای گره مخزن باید معادله خط C^+ را نوشت:

$$H_i^{n+1} = H_i^n = H_{res}, C^+ \Rightarrow \quad (۴۹-۳)$$

$$C^+: H_{res} = C_P - B_P Q_i^{n+1} \Rightarrow Q_i^{n+1} = \frac{C_P - H_{res}}{B_P}$$



شکل (۷-۳) خطوط مشخصه برای گره پایین دست.

۳-۱-۵- روش حل معادلات حاکم بر پمپ‌های موازی با روش عددی نیوتن رافسون

برای حل معادلات حاکم بر پمپ‌ها از روش عددی نیوتن رافسون استفاده می‌شود. روش نیوتن رافسون یک روش عددی تعیین ریشه یک تابع است.

$$x \rightarrow f(x) = 0 \quad (۵۰-۳)$$

فرض کنیم تابعی دارید که می‌خواهید ریشه (محل برخورد تابع با محور xها) آن را بیابید یا به اصطلاح آن را حل کنید. در روش نیوتن رافسون ابتدا x_0 را به عنوان حدس اولیه وارد فرمول زیر می‌کنیم تا x_1 به دست آید. به همین ترتیب ادامه می‌دهیم و این بار x_1 را در فرمول قرار می‌دهیم.

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (۵۱-۳)$$

به همین ترتیب خواهیم داشت:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (52-3)$$

هر چه تعداد دفعات تکرار بیشتر باشد x به دست آمده به ریشه نزدیک تر است. در ادامه روش حل معادلات حاکم را با استفاده از روش مذکور توضیح داده خواهد شد.

برای حل معادلات حاکم باید از آن ها نسبت به تمام متغیرها مشتق گرفته شود. در سیستم پمپاژ موازی به ازای هر پمپ یک α, ϑ مجهول وجود دارد که متغیرهای مساله محسوب می شوند.

مشتق معادلات تعادل هد نسبت به مجهولات به صورت رابطه (53-3) است.

$$if \ m = k \rightarrow$$

$$\frac{\partial F_{Hm}}{\partial v_k} = -(B_p + B_m)Q_{Rk} + 2v_k WH(x_k)H_{Rk} + A_1(x_k)H_{Rk}\alpha_k$$

$$\frac{\partial F_{Hm}}{\partial \alpha_k} = 2\alpha_k WH(x_k)H_{Rk} - v_k A_1(x_k)H_{Rk}$$

(53-3)

$$if \ m \neq k \rightarrow$$

$$\frac{\partial F_{Hm}}{\partial v_k} = -(B_p + B_m)Q_{Rk}$$

$$\frac{\partial F_{Hm}}{\partial \alpha_k} = 0$$

و مشتق معادلات تغییر سرعت نسبت به مجهولات به صورت رابطه است.

$$if \ m = k \rightarrow$$

$$\frac{\partial F_{Tm}}{\partial v_k} = 2v_k WB(x_k)H_{Rk} + \alpha_k B_1(x_k)$$

$$\frac{\partial F_{Tm}}{\partial \alpha_k} = 2\alpha_k WH(x_k) - v_k B_1(x_k)H_{Rk} + C_{torqk}$$

$$if \ m \neq k \rightarrow$$

$$\frac{\partial F_{Tm}}{\partial v_k} = 0$$

$$\frac{\partial F_{Hm}}{\partial \alpha_k} = 0$$

(54-3)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial H_1}{\partial v_1} & \frac{\partial H_1}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial H_1}{\partial v_{NPu}} & \frac{\partial H_1}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial H_1}{\partial \alpha_2} & \cdots & \frac{\partial H_1}{\partial \alpha_{NPu}} \\ \frac{\partial H_2}{\partial v_1} & \frac{\partial H_2}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial H_2}{\partial v_{NPu}} & \frac{\partial H_2}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial H_2}{\partial \alpha_2} & \cdots & \frac{\partial H_2}{\partial \alpha_{NPu}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial H_{NPu}}{\partial v_1} & \frac{\partial H_{NPu}}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial H_{NPu}}{\partial v_{NPu}} & \frac{\partial H_{NPu}}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial H_{NPu}}{\partial \alpha_2} & \cdots & \frac{\partial H_{NPu}}{\partial \alpha_{NPu}} \\ \frac{\partial T_1}{\partial v_1} & \frac{\partial T_1}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial T_1}{\partial v_{NPu}} & \frac{\partial T_1}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial T_1}{\partial \alpha_2} & \cdots & \frac{\partial T_1}{\partial \alpha_{NPu}} \\ \frac{\partial T_2}{\partial v_1} & \frac{\partial T_2}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial T_2}{\partial v_{NPu}} & \frac{\partial T_2}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial T_2}{\partial \alpha_2} & \cdots & \frac{\partial T_2}{\partial \alpha_{NPu}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial T_{NPu}}{\partial v_1} & \frac{\partial T_{NPu}}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial T_{NPu}}{\partial v_{NPu}} & \frac{\partial T_{NPu}}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial T_{NPu}}{\partial \alpha_2} & \cdots & \frac{\partial T_{NPu}}{\partial \alpha_{NPu}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \vdots \\ \Delta v_{NPu} \\ \Delta \alpha_1 \\ \Delta \alpha_2 \\ \vdots \\ \Delta \alpha_{NPu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_{H_1} \\ -F_{H_2} \\ \vdots \\ -F_{H_{NPu}} \\ -F_{T_1} \\ -F_{T_2} \\ \vdots \\ -F_{T_{NPu}} \end{bmatrix} \quad (55-3)$$

با استفاده از رابطه (55-3) مقادیر ماتریس Δ حاصل می‌شوند و با استفاده از رابطه (56-3) به

جواب‌های دقیق‌تر نزدیک می‌شود.

$$v = v + \Delta v$$

$$\alpha_1 = \alpha_1 + \Delta \alpha_1$$

(56-3)

$$\alpha_{NPu} = \alpha_{NPu} + \Delta \alpha_{NPu}$$

۳-۲- مدل الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم

الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم با الهام گرفتن از طبیعت معرفی و مورد استفاده قرار گرفته شده است. طبق تعریف علف هرز گیاهی است که در مکان‌های ناخواسته، وابسته به شرایط، تولید شده و رشد می‌کند، برای گیاهان زراعی مفید آفت جدی محسوب شده و جلوی رشد آن‌ها را می‌گیرد. علف‌های هرز بسیار قوی هستند و خود را با تغییرات محیط تطبیق می‌دهند. این الگوریتم در عین سادگی در یافتن نقاط بهینه بسیار موثر و سریع می‌باشد و بر اساس ویژگی‌های اولیه و طبیعی علف‌های هرز مانند تولید بذر، رشد و تنازع برای بقا در یک کلونی عمل می‌کند [۶].

۳-۲-۱- متغیرهای بهینه

متغیرهای بهینه، متغیرهای ورودی هستند که الگوریتم بهینه‌ساز با انتخاب تصادفی آن شروع به کار می‌کند که در الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم، بذر نامیده می‌شوند. بذرها ورودی‌های حل‌گر هستند و در تحقیق حاضر دو متغیر فاصله زمانی خاموشی بین دو گام و ترتیب خاموشی پمپ‌ها به‌عنوان متغیرهای بهینه (بذر) در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۲- توابع هدف

بعد از ورود متغیرها (بذرها) به حل‌گر، خروجی حاصل از آن که تابع هدف نامیده می‌شود، از حل‌گر استخراج شده و به الگوریتم بهینه‌ساز معرفی می‌شود. هدف اصلی مدل بهینه‌ساز بهینه کردن تابع (یا توابع) هدف بوده که در تحقیق حاضر مینیمم کردن فشار ماکزیمم و ماکزیمم کردن فشار مینیمم است و با رابطه (۳-۵۷) نشان داده شده است. در الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم از این توابع هدف به‌عنوان گیاه یاد می‌شود.

$$F = \min(H_{max}) \& \max(H_{min}) \quad (۳-۵۷)$$

که در آن H_{min} هد فشاری مینیمم در خط لوله و H_{max} هد فشاری ماکزیمم در خط لوله است.

۳-۲-۳- اعمال قید و تابع پنالتی

برای ساده‌سازی اعمال توابع هدف به الگوریتم بهینه‌ساز، فشار مینیمم به‌عنوان تابع هدف اصلی اعمال شده و جمعیت بر اساس بهترین فشارهای مینیمم (از بیشترین تا کمترین فشار مینیمم) دسته‌بندی می‌شود. برای کنترل فشار ماکزیمم، فشار ماکزیمم با قید فشار ($H_{max} = 120 \text{ m}$) مقایسه شده است و در صورت تجاوز فشار ماکزیمم از مقدار مجاز، تابع پنالتی^۱ برای آن اعمال شده است برای این کنترل روابط (۳-۵۸) اعمال شده است.

```

if  $H_{max} > 120$ 
 $H_{max} = 5 \times H_{max}$ ;
if  $H_{min} > 0$ 
 $H_{min} = -50 \times H_{min}$ ;
else
 $H_{min} = 50 \times H_{min}$ ;
end
end

```

(۵۸-۳)

برای کنترل فشار مینیمم (عدم تجاوز آن از فشار بخار که مساوی ۰,۲۳ متر در نظر گرفته شده است) روابط (۵۹-۳) نیز اعمال شده است.

```

if  $H_{min} < 0.23$ 
 $H_{max} = 5 \times H_{max}$ ;
if  $H_{min} > 0$ 
 $H_{min} = -50 \times H_{min}$ ;
else
 $H_{min} = 50 \times H_{min}$ ;
end
end

```

(۵۹-۳)

بعد از کنترل قیدهای فشار ماکزیمم و فشار مینیمم و اعمال پناستی، جمعیت به ترتیب از بیشترین فشارهای مینیمم به عنوان بهترین توابع هدف تا کمترین فشار مینیمم به عنوان بدترین تابع هدف، دسته بندی می شوند.

$Pop = sort(max(H_{min}))$ (۶۰-۳)

۳-۲-۴- تولید جمعیت اولیه تصادفی

در شروع فرآیند بهینه سازی ابتدا یک جمعیت محدود اولیه از بذرها در فضای حل مساله به صورت کاملاً تصادفی پراکنده می شود. انتخاب دانه های مرتبط با ترتیب خاموشی پمپ ها به صورت ماتریسی تصادفی از اعداد صفر و یک (اعداد باینری) صورت می گیرد که درواقع پمپ ها می توانند مقدار صفر به معنی

پمپ خاموش و یک به معنی پمپ روشن را بگیرند. اما در انتخاب دانه‌های مرتبط با فاصله زمانی خاموشی پمپ‌ها بین دو گام محدودیت اعداد باینری وجود ندارد و اعداد مثبت و غیرباینری هستند. انتخاب تعداد این جمعیت از این جهت دارای اهمیت است که در صورت انتخاب تعداد زیاد، زمان حل مساله به شدت افزایش می‌یابد و در صورتی که تعداد جمعیت انتخابی از حدی کمتر باشند، جمعیت معرف قسمتی کوچکی از فضای جست‌وجو خواهد بود و احتمال همگرا شدن مساله به مینیمم و ماکزیمم محلی به وجود می‌آید.

انتخاب تعداد جمعیت اولیه تصادفی، در هر مساله بسته به ابعاد مساله متفاوت است که با بررسی چند حالت مختلف می‌تواند به تعداد مناسب دست‌یافت. همچنین متداول‌ترین روش تولید جمعیت استفاده از توزیع یکنواخت^۱ است که در آن هر نقطه‌ای از فضای جست‌وجو دارای احتمال یکسان برای انتخاب شدن است.

۳-۲-۵- تولیدمثل

هر عضو از جمعیت می‌تواند طبق رابطه‌ی (۳-۶۱) و بر اساس توانایی خود، بین دو مقدار تعیین‌شده حداقل و حداکثر نرخ تولیدمثل، دانه جدید تولید کند. تعداد دانه‌هایی که هر گیاه می‌تواند تولید کند به‌طور خطی از کم‌ترین تعداد دانه‌ی ممکن تا بیشترین تعداد دانه ممکن تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، گیاه مطابق با برازندگی خود دانه تولید می‌کند (هر چه گیاه برازنده‌تر باشد، بذر بیشتری تولید می‌کند) و مقدار مینیمم و ماکزیمم کلونی نیز برای اطمینان حاصل کردن از رشد خطی است.

(۳-۶۱)

$$S_{min} \leq S \leq S_{max}$$

که در آن S میزان نرخ تولیدمثل دانه مادر در هر تکرار است، S_{min} کم‌ترین نرخ تولیدمثل دانه، S_{max} بیشترین نرخ تولیدمثل دانه است.

^۱ Uniform

در این تحقیق برای تولید مثل فاصله زمانی خاموشی بین دو گام و ترتیب خاموشی (بذر ها)، به ترتیب از دو شیوه تولید مثل استاندارد و باینری استفاده شد که در ادامه بدان می پردازیم.

۳-۲-۵-۱- تولیدمثل استاندارد

در تولیدمثل استاندارد، هر بذر بسته به میزان برازندگی خود می تواند تولیدمثل بیشتری داشته باشد بدین معنی که بذر تصادفی اولیه با برازندگی بیشتر، تعداد بذر بیشتری تولید می کند. این عملیات از طریق رابطه (۳-۶۲) در مدل بهینه ساز اعمال شده است که با عنوان نرخ تولید مثل بیان می شود. در حقیقت نرخ تولید مثل تعداد بذرهایی که بذر مادر می تواند تولید کند را مشخص کرده و جمعیت را سریعاً به سمت بذرهایی با برازندگی بیشتر سوق می دهد که خود یکی از محاسن این الگوریتم به شمار می آید.

$$S = S_{min} + ((S_{max} - S_{min}) \times \frac{Plant(i) - Worst_Plant}{Best_Plant - Worst_Plant}) \quad (۳-۶۲)$$

پس از مشخص شدن نرخ تولیدمثل هر بذر، مقدار بذر جدید (بذر تولید مثل شده) از جمع کردن مقدار بذر اولیه (بذر مادر) با یک مقدار تصادفی حاصل می شود که درواقع با این عمل بذرها در فضای مساله پراکنده می شوند. این مقدار تصادفی با توجه به σ_{iter} در هر گام با توجه به رابطه (۳-۶۳) به دست می آید.

$$\sigma_{iter} = \frac{(iter_{max} - iter)^n}{(iter_{max})^n} (\sigma_{initial} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad (۳-۶۳)$$

در معادله (۳-۶۳)، $iter_{max}$ بیشترین تعداد دفعات تکرار است. σ_{iter} مقدار انحراف معیار در مرحله انجام عملیات و n میزان غیرخطی بودن مدولاسیون را نشان می دهد. با این تبدیل اطمینان حاصل می شود که پراکندگی دانه ها در هر گام زمانی، به طور غیرخطی، کاهش می یابد که منجر به دسته بندی گیاهان برازنده و حذف گیاهان نامناسب می شود.

در نهایت، با اضافه کردن مقداری تصادفی به بذر مادر تولیدمثل استاندارد صورت می پذیرد. این عمل مطابق رابطه (۳-۶۴) انجام می شود.

$$Reproduce_W = W(i) + \sigma_{iter} \times rnd \quad (۳-۶۴)$$

که $W(i)$ ، i امین دانه‌ی جمعیت است، rnd مقداری تصادفی مثبت و غیرباینری و $Reproduced_W$ بذر تولیدمثل شده است.

۳-۲-۵-۲- تولیدمثل باینری

برای تولیدمثل در مسائل باینری، لازم است که دو تغییر اساسی در مدل تولیدمثل استاندارد ایجاد شود. اولاً در فضای باینری تمام بذرهای اولیه و بذرهای تولیدمثل شده می‌توانند فقط مقادیر ۰ و ۱ داشته باشند. همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، در مدل‌سازی تولیدمثل استاندارد، بذر اولیه با یک مقدار تصادفی جمع می‌شود که با تغییر دامنه‌ی مقادیر بذرها به ۰ و ۱ این امکان وجود ندارد (چراکه با جمع کردن مقداری تصادفی با هر یک از مقادیر باینری ۰ و ۱، به مقادیر غیرازاین دو می‌رسیم). بنابراین دومین تغییر بدین‌صورت است که باید عملگر جمع در این تعریف به نحوی دیگر فرمول‌بندی شود. برای رهایی از عملگر جمع، دیدگاه کلی‌تری اعمال می‌شود بدین ترتیب که به‌جای اضافه کردن مقداری تصادفی به دانه، تعدادی از دانه‌ها از ۰ به ۱ و از ۱ به ۰ تغییر می‌یابند. تعداد دانه‌هایی که مقادیرشان عوض می‌شوند به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. این تعداد به‌طور تصادفی و با توجه به σ_{iter} در هر گام به‌دست می‌آید که در بخش بعدی شرح داده‌شده است. این نحوه تولیدمثل دانه‌های باینری مشابه با جهش در الگوریتم ژنتیک است [۲۱].

۳-۲-۶- حذف رقابتی

بعد از چند مرحله تکرار دانه‌ها در کلونی در اثر تولیدمثل سریع به بیشترین مقدار مجاز خود می‌رسند. درعین‌حال انتظار می‌رود که گیاهان برازنده‌تر بیشتر از گیاهان نامناسب تکثیرشده‌اند. با رسیدن به تعداد ماکزیمم دانه‌های مجاز (P_{max}) باید مکانیزمی برای حذف دانه‌های ضعیف به کار گرفته شود. مکانیزم حذف دانه‌های ضعیف به‌صورت ذیل صورت می‌پذیرد: هنگامی که جمعیت اولیه تولید شد، هر گیاه، بسته به توانایی‌اش، مجاز به بذر تولید کند. سپس بذرها در فضای مساله پراکنده می‌شوند، درنهایت جمعیت بذرهای تولیدشده با جمعیت اولیه (والدین) ادغام‌شده و بر اساس بهترین تابع برازندگی، طبقه‌بندی

می‌شوند. در گام بعدی، به تعداد ماکزیمم دانه‌های مجاز (P_{max})، از بهترین دانه‌های جمعیت جدا شده و مابقی (دانه‌ها با بدترین برازندگی) حذف می‌شوند. بدین ترتیب والدین و فرزندان (جمعیت اولیه و جمعیت تولیدمثل شده) با یکدیگر سنجیده می‌شوند و به والدین با برازندگی ضعیف، فرصت ارائه برازندگی بهتر داده شده است.

برنامه کامپیوتری نوشته شده برای این الگوریتم بهینه‌ساز، در پیوست ارائه گردیده است.

۳-۳- روند کلی حل عددی

همان‌طور که در بخش‌های قبلی بدان اشاره شده است، برنامه کامپیوتری، شامل دو کد متلب است که در کد اول ضربه قوچ در خط لوله با سیستم پمپاژ آب بررسی می‌شود و در کد دوم به بهینه‌سازی کد اول پرداخته شده است. ابتدا به روند حل عددی کد اول می‌پردازیم:

۱. در شروع برنامه، تمامی مشخصات موردنیاز در روند حل از جمله: مشخصات لوله، طول لوله‌ها، مشخصات پمپ‌ها، ارتفاع آب در مخازن ابتدا و انتهای خط لوله و ... به‌طور کامل تعریف شده است.

۲. برای شروع فرآیند مدل‌سازی غیرماندگار، نخست لازم است جریان به‌صورت ماندگار شود. از نتایج حل ماندگار به‌عنوان گام اول مدل‌سازی غیرماندگار استفاده می‌شود.

۳. بعد از به دست آوردن حل ماندگار معادلات هیدرولیکی حاکم بر جریان، با داشتن شرایط مرزی و اولیه برای یک گام زمانی در تمام نقاط لوله محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است با توجه به این‌که از روش خطوط مشخصه صریح برای حل معادلات یادشده استفاده شده است، مشخصات جریان در گام زمانی بعد به‌طور مستقل از معادلات حاکم بر پمپ‌ها محاسبه می‌شوند.

۴. سپس مشخصات جریان (حل معادلات حاکم بر پمپ‌ها) در گام زمانی بعد در محل پمپ با استفاده از روش عددی نیوتن-رافسون محاسبه می‌شوند.

۵. با تکرار مراحل ۴ و ۵ تا زمان دلخواه مشخصات جریان در سیستم به‌طور کامل به‌دست می‌آید.

قبل از بررسی الگوریتم برنامه کامپیوتری دوم، لازم است که برنامه اول به صورت تابعی از ورودی‌ها و خروجی‌های مدنظر درآمد و سپس به روند حل کد بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم می‌پردازیم:

۱. در شروع کار، ابتدا مشخصات الگوریتم از جمله تعداد جمعیت اولیه، تعداد جمعیت نهایی، حداقل و حداکثر نرخ تولیدمثل، حداکثر تعداد تکرار، پراکندگی اولیه و ... به طور کامل بیان شده است.
۲. در مرحله بعد لازم است که جمعیت اولیه‌ای (دانه‌ها) به صورت کاملاً تصادفی مشخص شده و با استفاده از برنامه قبلی، مقادیر خروجی (گیاه) برای هر دانه تعیین می‌شوند.
۳. هر یک از دانه‌های تولیدشده در مرحله دوم، تولیدمثل کرده و در فضای مساله پراکنده می‌شوند. این دانه‌ی جدید بعد از فراخوانی در تابع، خروجی (گیاه تولیدمثل شده) را ارائه می‌دهد.
۴. مجموع گیاهان اولیه و گیاهان تولیدمثل شده در مجموعه‌ای بر اساس بهترین برازندگی، رتبه‌بندی می‌شوند و در صورت تجاوز تعداد کل این گیاهان از ماکزیمم مجاز جمعیت، جمعیت اضافی که بدترین رتبه‌ها را دارند حذف می‌شوند.
۵. بهترین دانه‌ای که در مرحله ۴، برازنده‌ترین گیاه را ارائه داده، به عنوان بهترین داده ارائه می‌شود.
۶. مراحل ۳-۵ تا زمان رسیدن به حداکثر تکرار ادامه پیدا می‌کند.

در این فصل روش حل عددی معادلات در دو بخش اصلی بررسی شده‌اند. حل معادلات حاکم بر هیدرولیک جریان با استفاده از روش خطوط مشخصه صریح و حل معادلات پمپ‌ها با روش عددی نیوتن رافسون بیان شده است. همچنین در بخش دوم، نحوه فرمولاسیون الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم ارائه شده است. در فصل آتی، با استفاده از حل هم‌زمان بخش اول معادلات اصلی (معادلات هیدرولیک جریان و معادلات حاکم بر پمپ‌ها) مدل‌سازی خطوط لوله صورت پذیرفته و نتایجی در این باب ارائه شده است. همچنین با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز، چند نمونه از خطوط انتقال آب پمپ‌دار همسان و غیرهمسان بهینه‌سازی شده است.

فصل چہارم: صحت سنجی

و ارائہ نتائج

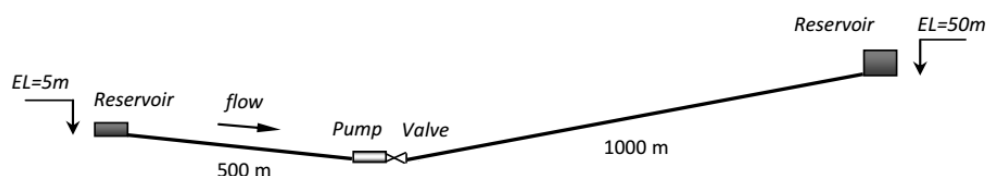
۴-۱- مقدمه

پس از ارائه مدل ریاضی در فصل سوم و روش‌های حل عددی و نحوه پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌ساز در فصل چهارم، در این فصل به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی خواهیم پرداخت. قبل از ارائه نتایج، باید از عملکرد صحیح مدل شبیه‌ساز اطمینان حاصل شود. برای راستی آزمایی یک مدل عددی، راهکارهای متفاوتی را می‌توان به کار برد. از جمله می‌توان مدل شبیه‌ساز را در مورد یک خاص با مدل آزمایشگاهی مقایسه نمود. در صورت عدم وجود یک مدل آزمایشگاهی می‌توان خروجی مدل را با حل‌های تحلیلی در حالات خاص و یا با نتایج مدل‌سازی‌های عددی دیگر مقایسه نمود.

در این تحقیق نتایج عددی مدل‌سازی با مقایسه با نتایج حاصل از قطع ناگهانی یک پمپ توسط کرامت و همکاران [۴] صحت‌سنجی گردید.

۴-۲- صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز

برای صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز سیستم انتقال آب پمپ‌دار، از نتایج آزمایشگاهی کرامت و همکاران استفاده شده است که به بررسی جدایی ستون مایع و فشارهای وارد بر سیستم لوله‌کشی ناشی از توقف یک پمپ پرداختند [۴]. مشخصات سیستم موردبررسی در تحقیق موردبررسی مطابق با شکل (۴-۱) است. که مشخصات کامل این سیستم در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱) طرح سیستم انتقال آب پمپ‌دار.

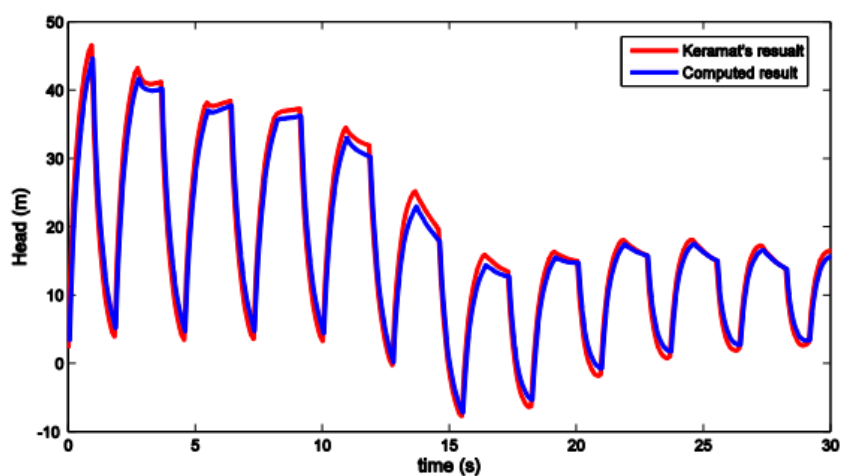
آن‌ها در تحقیق خود معادلات کلاسیک ضربه قوچ را با استفاده از روش خطوط مشخصه و همچنین از معادلات حاکم بر پمپ‌ها را با روش نیوتن رافسون برای به‌دست آوردن مشخصات جریان در نقاط مختلف لوله و محل پمپ استفاده کردند. سپس به تحلیل و بررسی فشار در قبل و بعد از پمپ پرداختند.

جدول (۴-۱) مشخصات سیستم انتقال آب.

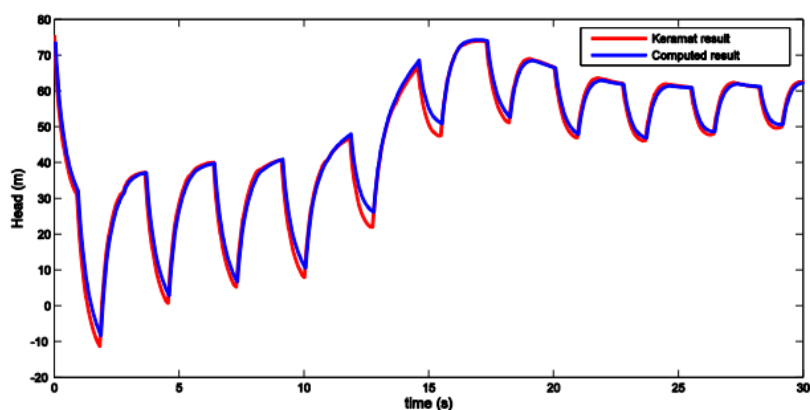
N_R	T_R	H_R	Q_R	I_{pump}	رقوم مخزن	ضریب افت شیر	هد مخزن پایین دست
1760rpm	101.08kg.m	94.55m	178.7lit/s	0.805kg.m.s ²	0m	0.3	60m

هد مخزن بالادست	رقوم مخزن پایین دست	رقوم مخزن بالادست	سرعت موج	ضریب اصطکاک	گام زمانی	زمان مدل سازی
10 m	50 m	5 m	1098 m/s	0.01	0.0455 s	20s

برای صحت سنجی نتایج مدل شبیه ساز، نتایج در محل قبل و بعد از پمپ استفاده می کنیم.



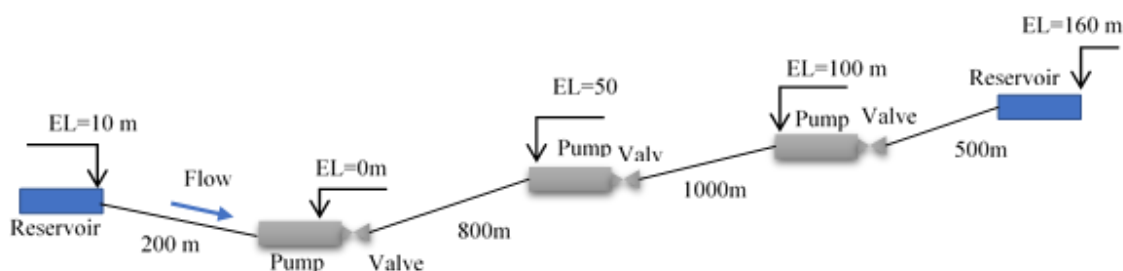
شکل (۴-۲) در محل قبل از پمپ (قرمز: کرامت و همکاران، آبی: نتایج مدل سازی عددی).



شکل (۴-۳) فشار در محل بعد از پمپ (قرمز: کرامت و همکاران، آبی: نتایج مدل سازی عددی).

۴-۳- خاموشی پمپ‌های همسان در سیستم انتقال آب

در اولین مرحله، خاموشی گام به گام سیستم انتقال آب پمپ‌دار بررسی می‌شود. این سیستم انتقال شامل ۳ ایستگاه پمپاژ است که هر ایستگاه متشکل از ۵ پمپ موازی است. در این بخش تمامی پمپ‌ها همسان در نظر گرفته شده است. پمپ‌ها در دو گام و با فاصله زمانی دلخواه ۸ ثانیه خاموش می‌شوند و زمان کل مدل‌سازی ۳۵ ثانیه است. طول لوله‌ها در طرح شماتیکی در شکل (۴-۴) مشخص شده است.



شکل (۴-۴) طرح شماتیک سیستم پمپاژ گروهی a

این سیستم شامل سه ایستگاه پمپاژ است که آب را از مخزنی با هد ۱۰ متر به مخزنی به هد ۱۶۰ متر پمپاژ می‌کند و سه حالت مختلف خاموشی بررسی شده است، بدین ترتیب که در هر حالت، تعداد مختلفی پمپ در هر ایستگاه پمپاژ خاموش شده است. قطر لوله‌ها^۱ در تمام طول مسیر ثابت و برابر ۰٫۹ متر در نظر گرفته شده است. مشخصات هر پمپ در جدول (۴-۲) ذکر شده است.

جدول (۴-۲) مشخصات یک پمپ در سیستم همسان.

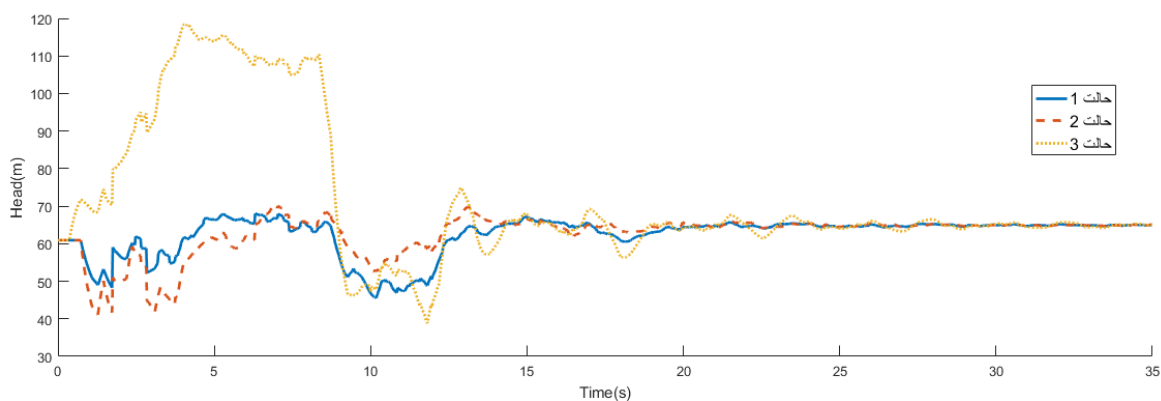
N_R (rpm)	T_R (kg.m)	H_R (m)	Q_R (m ³ /s)
۱۷۶۰	۱۰۱٫۰۸	۹۴٫۵۵	۰٫۱۷۸۷

در جدول (۴-۳) چند نمونه محدود از ترتیب خاموشی پمپ‌ها در هر ایستگاه بیان شده است (به دلیل همسان بودن پمپ‌ها فقط تعداد پمپ‌های خاموش شده در هر گام عنوان شده است). در ادامه تغییرات هد فشاری را در نقاط خاصی از لوله بررسی خواهیم کرد (این نقاط به‌طور دلخواه در وسط هر خط لوله انتخاب شده‌اند).

^۱ قطر لوله‌ها با توجه به دبی عبوری از خط لوله در نظر گرفته شده است به‌طوری که حداکثر سرعت مجاز در حالت جریان ماندگار از ۱٫۵ m/s تجاوز ننماید.

جدول (۴-۳) مشخصات خاموشی حالات مختلف پمپ‌های بررسی شده.

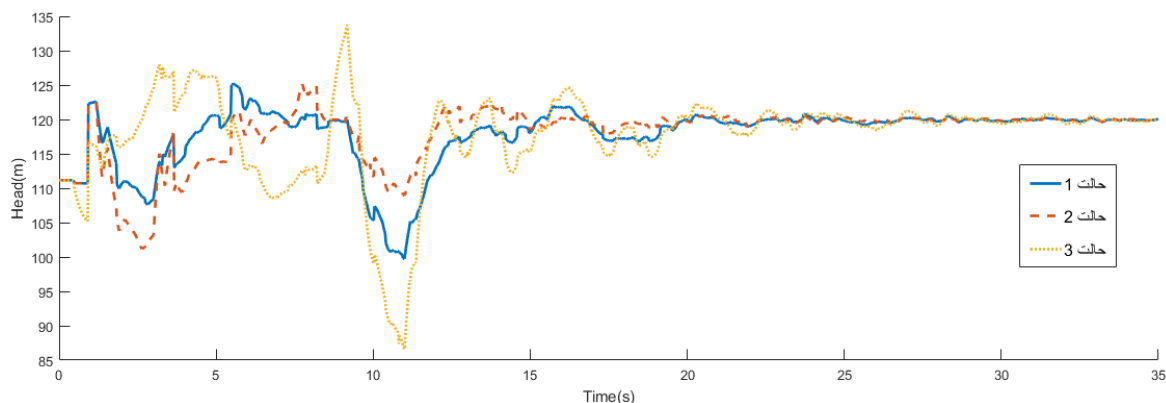
شماره ایستگاه	تعداد کل پمپ‌های خاموش شده در گام اول	تعداد کل پمپ‌های خاموش شده در گام دوم	
ایستگاه ۱	۲	۳	حالت ۱
ایستگاه ۲	۲	۳	
ایستگاه ۳	۲	۳	
ایستگاه ۱	۴	۱	حالت ۲
ایستگاه ۲	۴	۱	
ایستگاه ۳	۴	۱	
ایستگاه ۱	۱	۴	حالت ۳
ایستگاه ۲	۳	۲	
ایستگاه ۳	۲	۳	



شکل (۴-۵) نمودار تغییرات هد فشاری در زمان، برای سه حالت مختلف خاموشی ۱، ۲ و ۳ در مکان ۶۰۰ متری از ابتدای خط لوله.

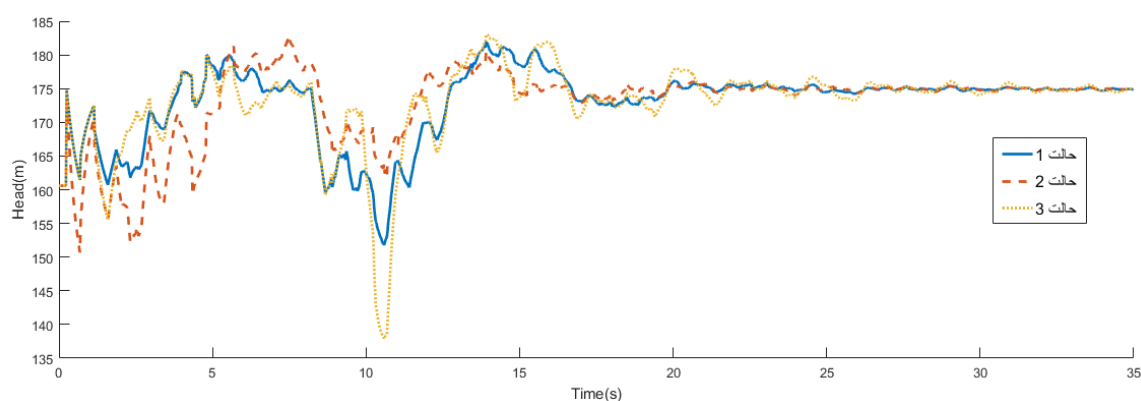
در شکل (۴-۵) مشاهده می‌شود که با انتخاب حالت خاموشی ۲، فشار ماکزیمم می‌تواند تا ۴۰٫۵

درصد نسبت به حالت ۳ کاهش یابد. همچنین فشار مینیمم حالت ۲ تا ۵٫۷ درصد نسبت به حالت ۳ افزایش داشته است.



شکل (۴-۶) نمودار تغییرات هد فشاری در زمان، برای سه حالت مختلف خاموشی ۱، ۲ و ۳ در مکان ۱۵۰۰ متری از ابتدای خط لوله.

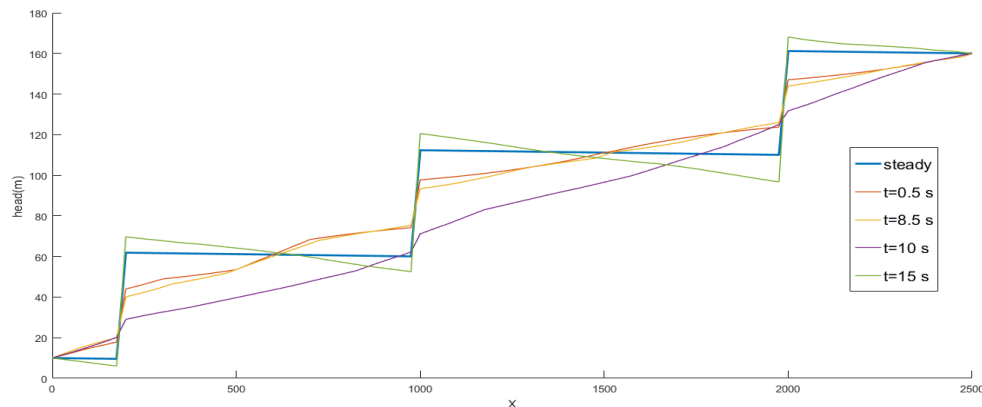
با توجه به شکل (۴-۶) فشار ماکزیمم در حالت ۲، به میزان ۶,۴ درصد از حالت ۳ کمتر است و فشار مینیمم حالت ۲ نیز به میزان ۱۶,۹ درصد از حالت ۳ بیشتر است.



شکل (۴-۷) نمودار تغییرات هد فشاری در زمان، برای سه حالت مختلف خاموشی ۱، ۲ و ۳ در مکان ۲۲۵۰ متری از ابتدای خط لوله.

در شکل (۴-۷) نیز مشابه با نمودارهای قبل ارائه شده، در فاصله ۲۲۵۰ متری نیز حالت خاموشی ۳ نسبت به سایر حالات، فشار مینیمم نامطلوبی ایجاد کرده و فشار مینیمم حالت ۲ به میزان ۹,۳ درصد از فشار مینیمم حالت ۳ بیشتر است.

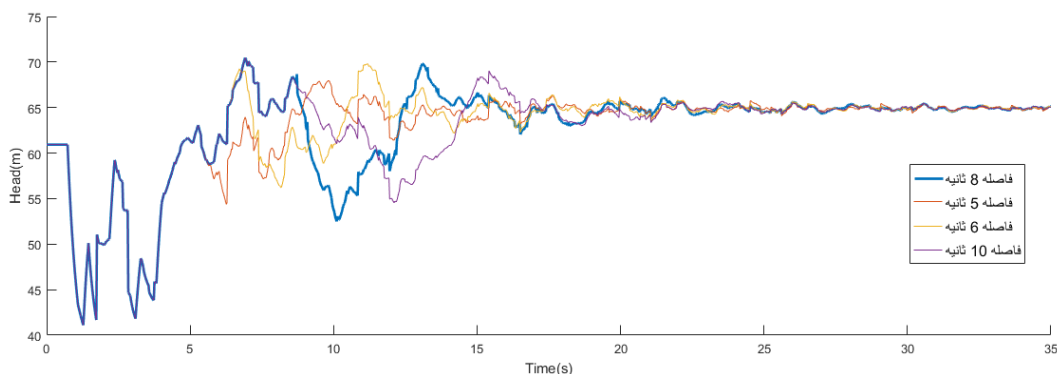
در شکل (۴-۸) تغییرات هد فشاری در طول لوله در زمانهای مختلف از جمله قبل از خاموشی پمپها (حالت پایدار) و ... ترسیم شده است.



شکل (۴-۱) تغییرات هد فشاری در طول لوله در زمان‌های مختلف از جمله قبل از خاموشی پمپ‌ها و 0.5 ، 10 ، 15 S بعد از خاموشی پمپ‌ها با حالت خاموشی ۱.

به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان کرد که ترتیب خاموشی در کاهش فشارهای ماکزیمم و افزایش فشارهای مینیمم وارد بر سیستم انتقال آب به‌شدت تاثیرگذار است. مشاهده می‌شود که با انتخاب ترتیب خاموشی می‌توان فشارهای ماکزیمم را تا 40.5 درصد کاهش و فشارهای مینیمم را تا 9.3 درصد افزایش داد.

از آنجایی ترتیب خاموشی می‌تواند، ترکیب‌های متفاوتی داشته باشد، استفاده از یک الگوریتم بهینه‌ساز که ترکیبات مختلفی را در نظر بگیرد و بهترین نتیجه را ارائه دهد، سودمند به‌نظر می‌رسد. هم‌چنین باید توجه شود که فاصله زمانی خاموشی پمپ‌ها بین دوگام نیز بر فشارهای وارد بر خط لوله تاثیر می‌گذارد. برای دریافت این موضوع، ترتیب خاموشی حالت ۲ که نسبت به سایر حالات فشارهای بهتری ارائه داده (فاصله زمانی خاموشی بین دو گام برابر زمان دلخواه ۸ ثانیه) را با فاصله زمانی‌های خاموشی بین دوگام دلخواه دیگر مقایسه می‌کنیم.



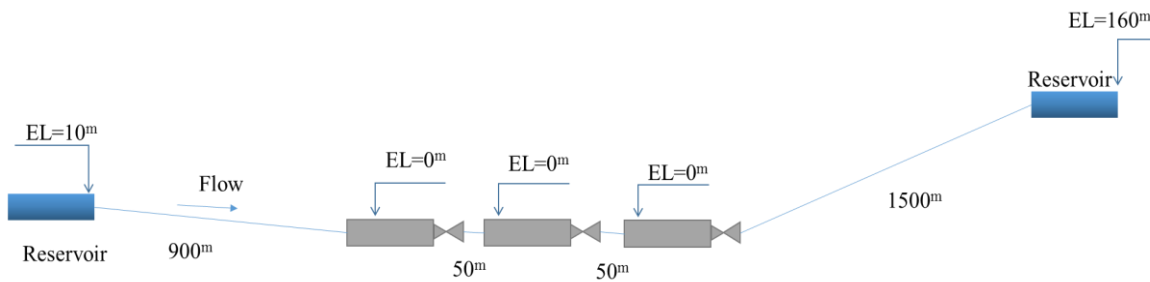
شکل (۹-۴) نمودار تغییرات فشار با ترتیب خاموشی حالت ۲ و فاصله زمانی‌های متفاوت در فاصله ۶۰۰ متری از ابتدای خط لوله.

با توجه به شکل (۹-۴) در یک سیستم پمپاژ خاص و با یک ترتیب خاموشی معین (ترتیب خاموشی حالت ۲)، تنها با تغییر دادن فاصله زمانی خاموشی بین دو گام می‌توان فشار ماکزیمم را تا ۳,۶ درصد کاهش داد (فشار ماکزیمم با فاصله زمانی خاموشی ۶ ثانیه ۳,۶ درصد نسبت به فشار ماکزیمم با فاصله زمانی ۸ ثانیه کمتر است).

در یک سیستم پمپاژ بزرگ، ترتیب خاموشی پمپ‌ها و فاصله زمانی بین دو گام خاموش شدن این پمپ‌ها در فشارهای وارد بر خط انتقال تاثیر بسزایی دارد. از آن‌جا که بررسی ترکیبات مختلف و این فاصله زمانی به‌طور هم‌زمان (به علت تعدد سناریوهای ممکن برای این دو متغیر) پروسه‌ای تکراری و زمان‌بر است، پیدا کردن بهترین جواب ممکن به الگوریتم بهینه‌ساز سپرده شد. در بخش‌های بعدی سعی شده است تا با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم، ترتیب خاموشی و فاصله زمانی مناسبی را برای کاهش فشار ماکزیمم و افزایش فشار مینیمم ارائه شود.

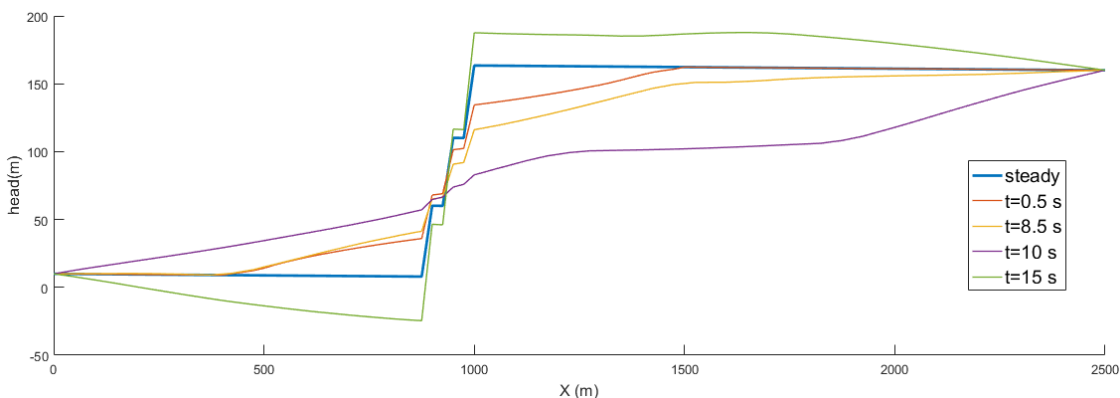
۴-۳-۱- اثر تغییر طول لوله بین ایستگاه‌های پمپاژ

با ایجاد تغییر در طرح لوله‌های شکل (۴-۴)، طرح شماتیک شکل (۴-۱۰) حاصل شده است که به‌جز در طرح لوله‌ها در تمام موارد از جمله مشخصات پمپ‌ها، تعداد ایستگاه و پمپ، قطر لوله و ... کاملاً مشابه هستند.



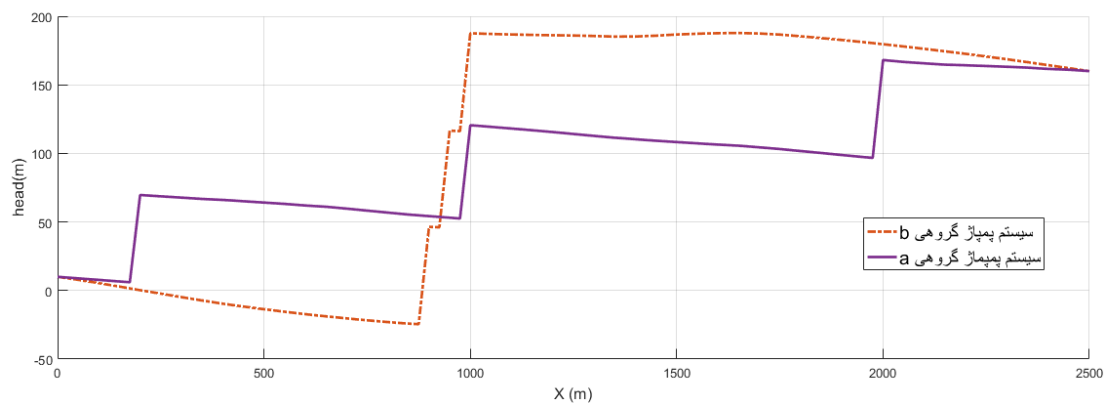
شکل (۱۰-۴) طرح شماتیک سیستم پمپاژ گروهی b با طرح لوله تغییر یافته.

در شکل (۱۱-۴) تغییرات فشار در طول خط لوله در سیستم پمپاژ گروهی که طرح لوله‌های آن مطابق با شکل (۱۰-۴) تغییر یافته، ارائه شده است. این بررسی در زمان‌های مختلفی از جمله: قبل از خاموشی پمپ‌ها (جریان ماندگار)، 0.5 s ، 8.5 s ، 10 s ، 15 s و با حالت خاموشی ۱ (جدول (۳-۴) را ببینید) انجام شده است. با توجه به فشار مینیمم در زمان ۱۵ ثانیه مشاهده می‌شود که فشار مینیمم به مراتب از فشار بخار آب کمتر شده است.



شکل (۱۱-۴) تغییرات فشار در طول لوله در سیستم پمپاژ گروهی b در زمان‌های مختلف.

به منظور بررسی دقیق‌تر، تغییرات فشار دو سیستم پمپاژ گروهی در شکل (۱۲-۴) مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در سیستم پمپاژ گروهی a ، فشار مینیمم -3.27 متر و سیستم b مقدار -24.55 متر است. هر دو سیستم فشار منفی کمتر از فشار بخار دارند اما سیستم b به طور قابل توجهی فشار منفی تولید می‌کند و در مقایسه با سیستم a مطلوب نمی‌باشد. به همین سبب، در ادامه در روند بهینه‌سازی از سیستم پمپاژ گروهی a که در شکل (۴-۴) ارائه شده است استفاده خواهد شد.



شکل (۴-۱۲) تفاوت فشار در طول لوله در دو سیستم پمپاژ a و b در زمان ۱۵ ثانیه بعد از خاموشی پمپ‌ها.

۴-۴- خاموشی پمپ‌های ناهمسان در سیستم انتقال آب

در این بخش خاموشی گام به گام پمپ‌های ناهمسان در سیستم انتقال آب را بررسی می‌کنیم. به جز مشخصات پمپ‌های ناهمسان، جزئیات این بخش نیز مشابه بخش قبل است. مشخصات پمپ‌های ناهمسان در جدول (۴-۴) ارائه شده است. پمپ‌ها در دو گام و با فاصله زمانی دلخواه ۸ ثانیه خاموش می‌شوند و زمان کل مدل‌سازی ۳۵ ثانیه است.

جدول (۴-۴) مشخصات پمپ‌های ناهمسان.

	N_R (rpm)	T_R (kg.m)	H_R (m)	Q_R (m ³ /s)
a	۱۵۸۰	۱۰۱,۰۸	۱۲۴,۵۵	۰,۳۳۹
b	۱۴۵۰	۱۰۱,۰۸	۳۷۸	۲,۱۱
c	۱۷۶۰	۱۰۱,۰۸	۹۴,۵۵	۰,۱۷۸۷

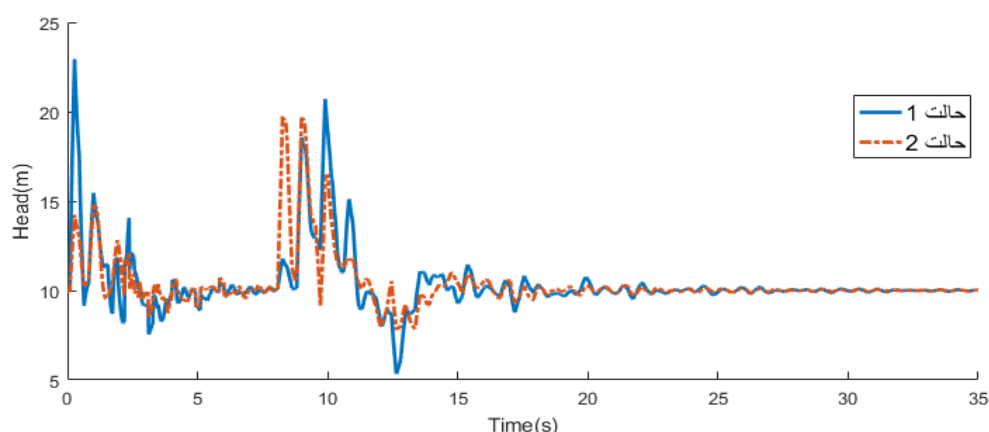
این سیستم شامل سه ایستگاه پمپاژ است که آب را از مخزنی با هد ۱۰ به مخزنی به هد ۱۶۰ پمپاژ می‌کند و در هر ایستگاه شامل ۴ پمپ است که ترکیبی از ۲ پمپ a، یک پمپ b و یک پمپ c است. قطر لوله‌ها در طول مسیر ثابت بوده و برابر ۱,۶ متر در نظر گرفته شده است. پمپ‌ها در دو گام و با فاصله زمانی دلخواه ۸ ثانیه و با ترتیب خاموشی مطابق با جدول (۴-۵) خاموش می‌شوند.

جدول (۴-۵) ترتیب خاموشی پمپ‌های ناهمسان در سیستم ۲

پمپ‌های خاموش شده در گام دوم			پمپ‌های خاموش شده در گام اول			شماره ایستگاه	حالت خاموشی
c	b	a	c	b	a		
-	۱	-	۱	-	۲	ایستگاه ۱	حالت ۱
۱	-	۲	-	۱	-	ایستگاه ۲	
۱	-	۲	-	۱	-	ایستگاه ۳	
۱	-	۲	-	۱	-	ایستگاه ۱	حالت ۲
۱	-	۲	-	۱	-	ایستگاه ۲	
۱	-	۲	-	۱	-	ایستگاه ۳	

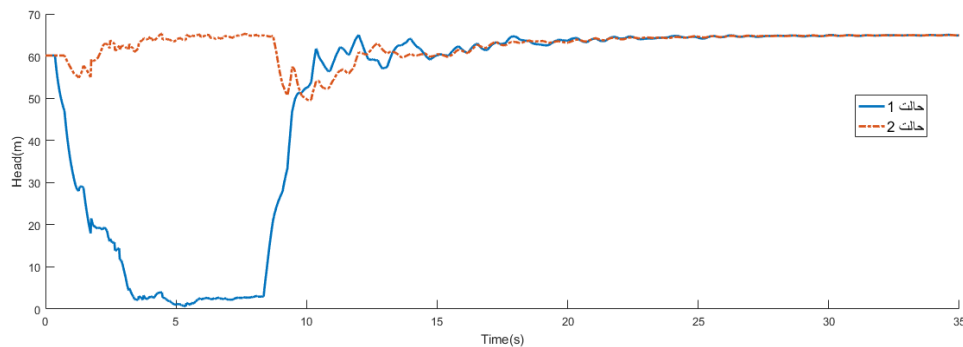
در شکل (۴-۱۳) و شکل (۴-۱۴) نمودارهای تغییرات هد فشاری به زمان برای دو حالت خاموشی ارائه شده در جدول (۴-۵) در فواصل ۱۰۰ و ۶۰۰ متری از ابتدای خط لوله ترسیم شده است. تنها با یک تغییر کوچک در ترتیب خاموشی پمپ‌ها، می‌توان تغییرات فشار به‌وجود آمده را در نمودارهای مذکور مشاهده کنیم.

با توجه به شکل (۴-۱۳) تنها با تغییر الگوی خاموشی از حالت ۱ به ۲ مشاهده می‌شود که فشار ماکزیمم در فاصله ۱۰۰ متری از ابتدای خط لوله را می‌توان به‌اندازه ۱۳٫۸ درصد کاهش و فشار مینیمم را ۴۵٫۶ درصد افزایش داد (این افزایش و کاهش فشار حالت ۲ نسبت به حالت ۱ است).



شکل (۴-۱۳) نمودار تغییرات هد فشاری برای خاموشی سیستم ناهمسان با حالت خاموشی ۱ و ۲ در فاصله ۱۰۰ متری از ابتدای خط لوله.

هم‌چنین با توجه به شکل (۴-۱۴) در می‌یابیم که با تغییر الگوی خاموشی حالت ۱ به ۲، در فاصله ۶۰۰ متری از ابتدای خط لوله، فشار ماکزیمم به‌اندازه ۰,۴ درصد افزایش یافته اما فشار مینیمم به‌طور قابل ملاحظه‌ای از ۰,۶ متر به ۴۹,۴ متر رسیده است.



شکل (۴-۱۴) نمودار تغییرات هد فشاری برای خاموشی سیستم ناهمسان با حالت خاموشی ۱ و ۲ در فاصله ۶۰۰ متری از ابتدای خط لوله.

با توجه به دو محل مورد بررسی، می‌توان مشاهده کرد که با تغییری به‌ظاهر کوچک در الگوی خاموشی، تغییرات زیادی در هد فشاری ایجاد می‌شود، اما برای تشخیص این که کدام حالت در مجموع فشارهای بهتری را ارائه می‌دهد، لازم است که فشار در تمام طول لوله بررسی شود. که خارج از هدف این بخش است.

در این بخش سعی شده است تا با نشان دادن تغییرات شدید هد فشاری با تغییر الگوی خاموشی در سیستم‌های پمپاژ ناهمسان حساسیت ویژه این پمپ‌ها را بیان کرده و به اهمیت بررسی تمامی حالات ممکن را پی ببریم.

۴-۵- بهینه‌سازی خط انتقال آب

در این بخش سعی شده است به بررسی فاصله زمانی خاموشی پمپ‌ها در دو گام و هم‌چنین انتخاب ترتیب خاموشی پمپ‌ها در هر ایستگاه (فاصله زمانی خاموشی پمپ‌ها در دوگام و ترتیب خاموشی متغیرهای بهینه هستند) پرداخته شود به‌نحوی که فشار ماکزیمم در کم‌ترین حالت ممکن و فشار مینیمم در بیشترین حالت خود قرار گیرد (فشار ماکزیمم و مینیمم توابع هدف هستند). از آنجایی که

احتمالا تجاوز فشار منفی از فشار بخار آب در اکثر دانه‌های تصادفی بسیار زیاد و احتمال تجاوز فشار مثبت از حد مجاز بسیار کمتر است^۱، معیار رتبه‌بندی گیاهان کم‌ترین فشار منفی در نظر گرفته شده است. برای اطمینان حاصل کردن از عدم تجاوز فشارهای مثبت از حد مجاز، تمام فشارهای ماکزیمم با مقدار مجاز فشار ماکزیمم در لوله مقایسه شده و در صورت تجاوز فشار ماکزیمم، تابع جریمه‌ای برای آن در نظر گرفته شده است.

ماکزیمم فشار مجاز در این تحقیق ۱۲۰ متر و مینیمم فشار مجاز، فشار بخار آب در دمای 20°C در نظر گرفته شده که برابر 0.023 ، اتمسفر یا 0.2385 متر آب است.

مشخصات الگوریتم بهینه‌ساز بدین ترتیب اعمال شده است:

جمعیت اولیه ۵۰ ($npop_0 = 50$)، ماکزیمم جمعیت مجاز ۸۰ ($npop = 80$)، حداقل نرخ تولیدمثل ۱ ($S_{min} = 1$)، حداکثر نرخ تولیدمثل ۴ ($S_{max} = 4$)، حداکثر تکرار ۲۰ ($MaxIt = 20$)، درجه مدولاسیون در پراکندگی تولیدمثل ۳ ($n = 3$)، پراکندگی اولیه در فاصله زمانی خاموشی بین دو گام 0.7 ($\sigma_{initial1} = 0.7$)، پراکندگی اولیه در ترتیب خاموشی ۰.۳ ($\sigma_{initial2} = 0.2$) و پراکندگی نهایی 0.001 ($\sigma_{final} = 0.001$).

این بهینه‌سازی در سیستم پمپاژ با پمپ‌های همسان و ناهمسان در هر ایستگاه بررسی شده است. لازم به ذکر است پمپ‌های ناهمسان به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که سرعت ویژه‌ی یکسانی ($N_s = 24.5$) داشته باشند.

۴-۵-۱- بهینه‌سازی سیستم انتقال آب با پمپ‌های همسان

در این بخش، سیستم‌های انتقال پمپ‌دار مختلفی در نظر گرفته شده است. مشخصات تعداد ایستگاه‌های پمپاژ، تعداد پمپ در هر ایستگاه، قطر لوله‌ها در هر حالت و مشخصات پمپ‌ها در هر سیستم مطابق با جدول (۴-۶) ارائه شده است. طول لوله‌ها در تمام سیستم‌های این گروه مطابق طرح شماتیک در شکل

^۱ این نکته با بررسی چندین حالت خاص با زمان‌های خاموشی رندوم حاصل شد.

(۴-۴) است. فشار مینیمم و ماکزیمم این سیستم‌ها توسط الگوریتم بهینه‌ساز بهینه شده و فاصله زمانی

خاموشی و ترتیب خاموشی به‌عنوان پارامترهای موثر در سه سیستم مختلف بررسی شده است.

جدول (۶-۴) مشخصات سیستم‌های موردبررسی در بخش پمپ‌های همسان.

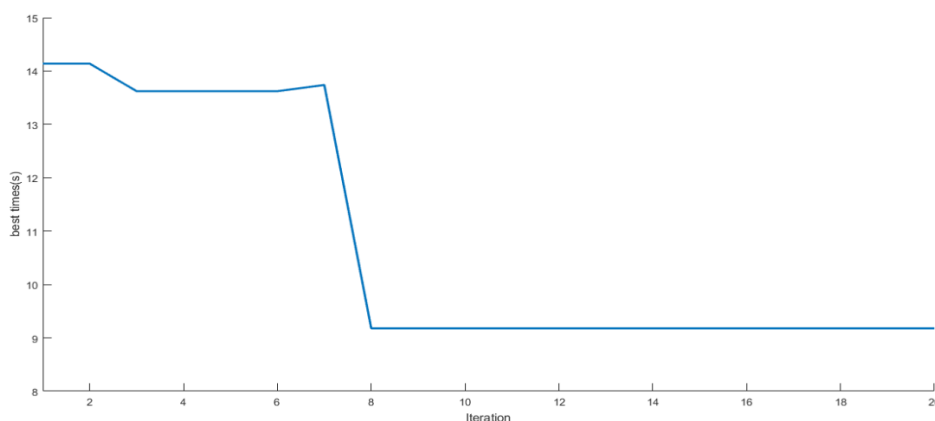
سیستم	تعداد ایستگاه پمپاژ	تعداد پمپ در هر ایستگاه	مشخصات پمپ‌ها	قطر لوله (m)
سیستم ۱	۳	۵	جدول (۲-۴)	۰,۹
سیستم ۲	۳	۵	جدول a-(۴-۴)	۱,۲
سیستم ۳	۳	۵	جدول b-(۴-۴)	۳

سیستم ۱) این سیستم شامل سه ایستگاه پمپاژ است که در هر ایستگاه ۵ پمپ موازی قرار دارد که

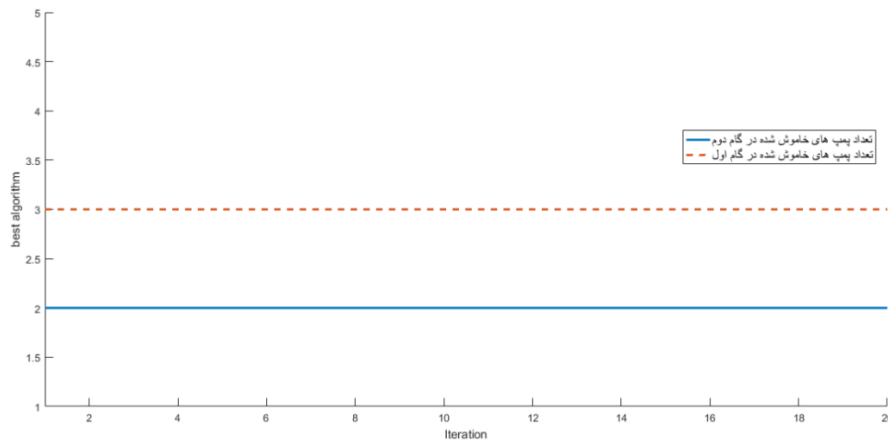
مشخصات این پمپ‌ها در جدول (۴-۴) مشخصات پمپ‌های ناهمسان مشخص شده است. نمودار تغییرات

فاصله زمانی به تکرار و تغییرات ترتیب خاموشی به تکرار، به‌ترتیب در شکل (۱۵-۴) و شکل (۱۶-۴)

نشان داده شده است.



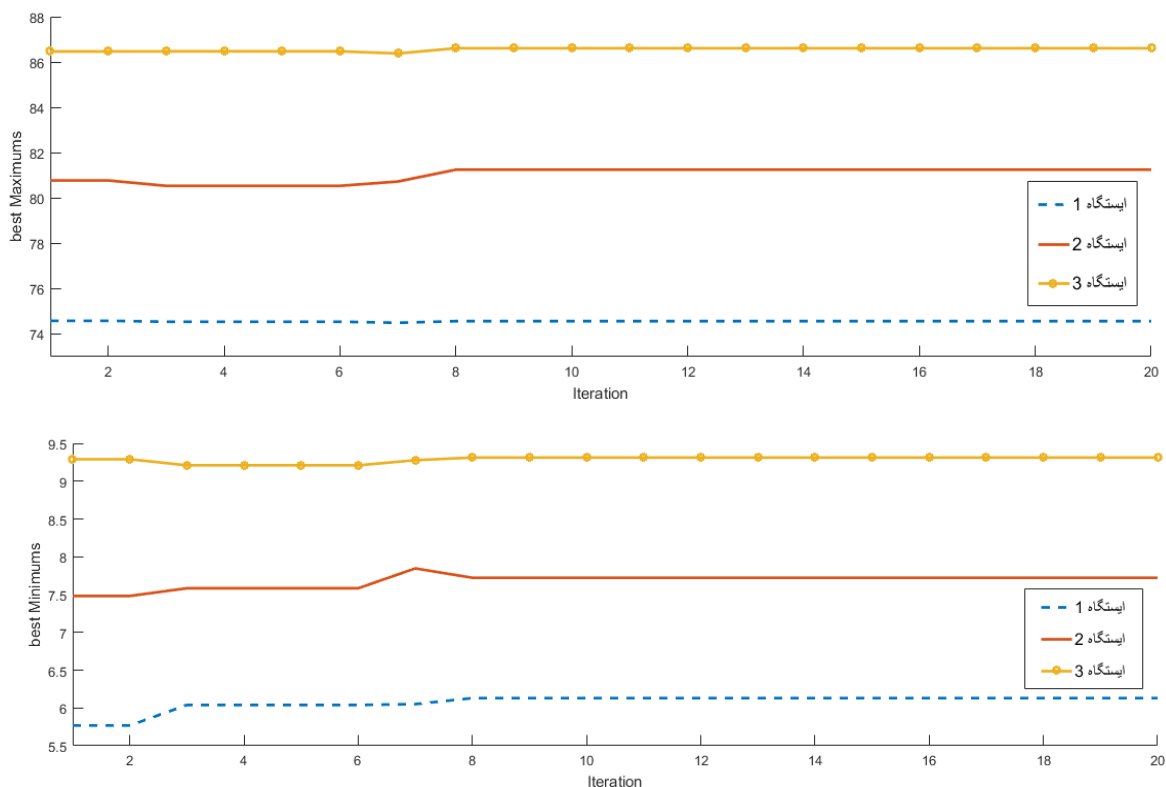
شکل (۱۵-۴) نمودار تغییرات فاصله زمانی بهینه به تکرار برای سیستم ۱، در هر سه ایستگاه.



شکل (۴-۱۶) نمودار تغییرات ترتیب خاموشی پمپ‌ها به تکرار در سیستم ۱، در هر سه ایستگاه.

همان‌طور که در شکل (۴-۱۵) مشاهده می‌شود، زمان بعد از تعداد گام محدودی به ۹,۱۸ ثانیه همگرا شده است. هم‌چنین در شکل (۴-۱۶) مشاهده می‌شود که تعداد پمپ‌های خاموش‌شده در هر گام، از اولین تکرار به مقدار بهینه خود رسیده، که خود نشان از توانایی بالای این الگوریتم در حل مسائل باینری دارد.

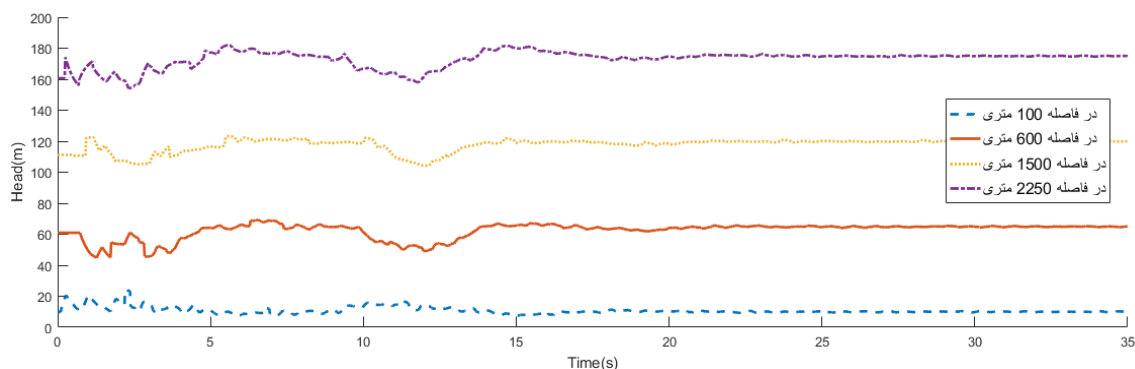
در ادامه تغییرات تابع هدف (فشار مینیمم و ماکزیمم) در هر تکرار را در شکل (۴-۱۷) مشاهده می‌کنیم.



شکل (۴-۱۷) تغییرات تابع هدف (ماکزیمم و مینیمم هد فشاری) در تکرار برای سیستم ۱

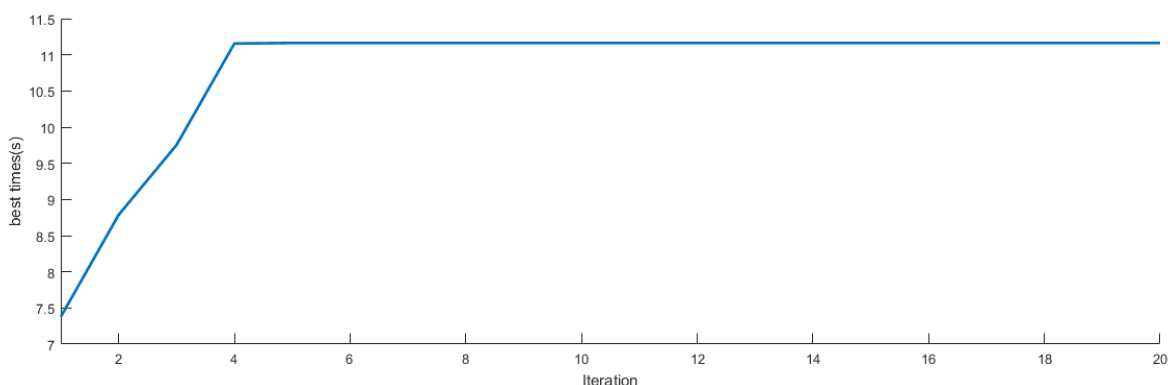
در شکل (۴-۱۷) بعد از چند تکرار توابع هدف به مقدار ماکزیمم و مینیمم مشخص همگرا شده‌اند و درصد تغییرات در ۱۰ گام نهایی به صفر رسیده است. با توجه به این نمودار می‌توان مشاهده کرد که تغییرات فشار (چه فشار ماکزیمم و چه فشار مینیمم) از تکرار اول تا تکرار آخر، دستخوش تغییرات زیادی نشده است و در تمامی تکرارها، نزدیک به فشار بهینه نهایی است (هم‌چنین در تمام تکرارها از حد مجاز تجاوز نمی‌کند که همین برای اطمینان از صحت عملکرد سیستم بعد از خاموشی کافی است). اما با دقت در نمودار شکل (۴-۱۵) که فاصله زمانی خاموشی بین دو گام در هر تکرار را ارائه می‌دهد، می‌توان به‌وضوح مشاهده کرد که این متغیر در هر تکرار تغییراتی دارد درحالی‌که تابع هدف تغییرات محسوسی ندارد. این بدان معنا است که زمان بهینه برای خاموشی بین دو گام، جوابی مطلق نیست و با زمان‌های خاموشی بین دو گام دیگری نیز می‌توان به این توابع هدف مطلوبی رسید. زمان بهینه نهایی معرفی شده یکی از بهترین حالات ممکن است و تنها حالت مناسب خاموشی نیست. از جمله زمان‌های مناسب دیگر برای فاصله خاموشی بهینه می‌توان به بازه ۹ تا ۱۴ ثانیه نیز اشاره کرد.

در شکل (۴-۱۸) نمودار تغییرات هد فشاری در مکان‌های مختلفی از جمله: ۱۰۰، ۶۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۲۵۰ متری از ابتدای خط لوله در طول زمان نشان داده شده است. زمان مدل‌سازی طوری انتخاب شده است که تغییرات فشار ناشی از غیرماندگاری جریان در طول لوله، مستهلک شده و در نهایت جریان ماندگار شده است. لازم به ذکر است فشارهای نشان داده شده در شکل (۴-۱۸) به صورت فشارهایی از سطح مبنا نشان داده شده است.

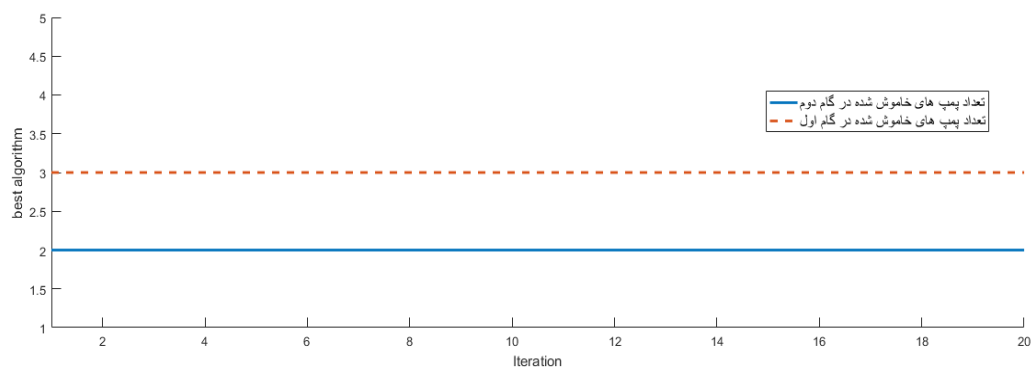


شکل (۴-۱۸) تغییرات هد فشاری به زمان در سیستم ۱، در مکان‌های ۱۰۰m، ۶۰۰m، ۱۵۰۰m، ۲۲۵۰m از ابتدای خط لوله.

سیستم ۲) این سیستم از لحاظ تعداد پمپ مشابه سیستم ۱ است و مشخصات هر یک از پمپ‌های همسان در این سیستم در جدول (۴-۴) a-عنوان شده است. در ادامه با بررسی این سیستم پمپاژ نمودار تغییرات فاصله زمانی به تکرار و تغییرات ترتیب خاموشی به تکرار، به ترتیب در شکل (۴-۱۹) و شکل (۴-۲۰) نشان داده شده است.

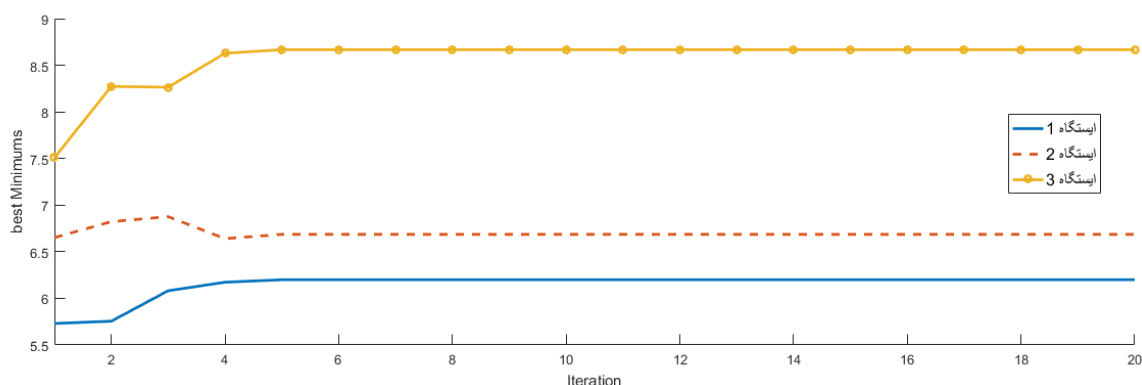
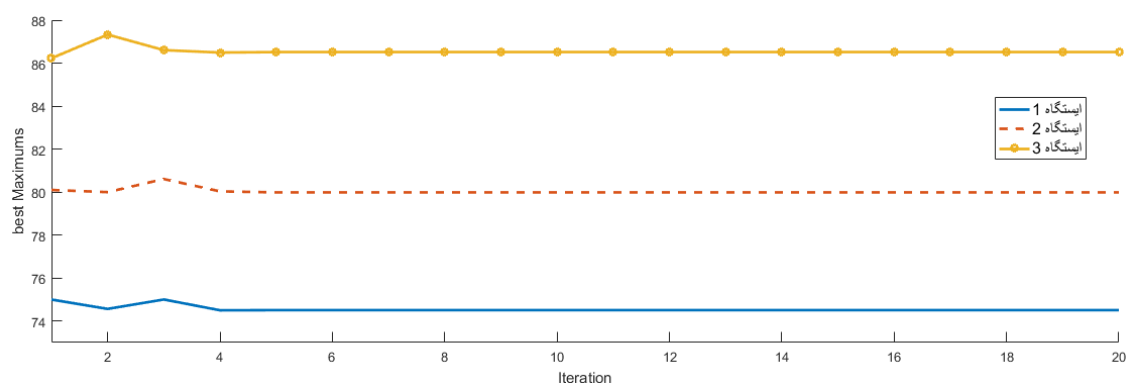


شکل (۴-۱۹) نمودار تغییرات فاصله زمانی خاموشی بین دو گام در تکرار برای هر سه ایستگاه در سیستم ۲.



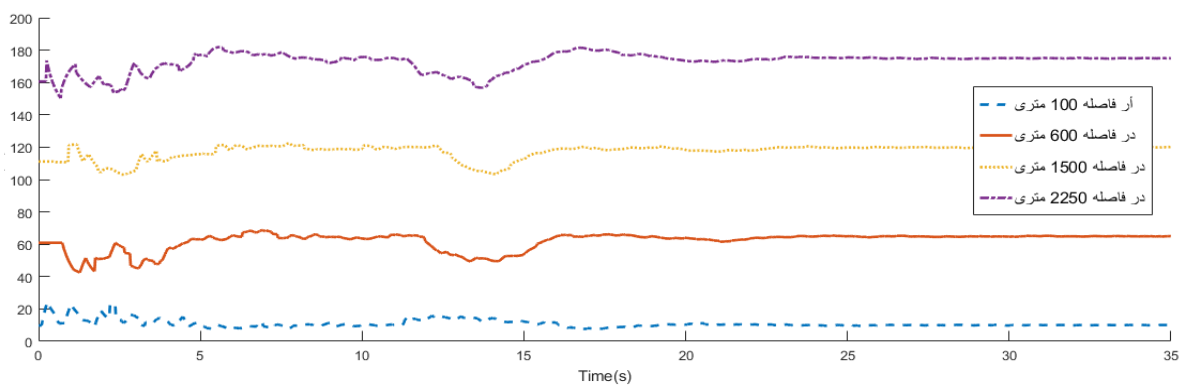
شکل (۴-۲۰) نمودار تغییرات ترتیب خاموشی به تکرار در هر سه ایستگاه در سیستم ۲.

همان طور که در نمودار شکل (۴-۱۹) مشاهده می شود، تغییرات زمان بعد از تعداد محدودی به زمان ۱۱،۱۶ ثانیه همگرا شده و درصد تغییرات در گام های نهایی به صفر رسیده است. تعداد پمپ های خاموش شده در هر گام نیز از اولین تکرار به مقدار بهینه خود رسیده است (شکل (۴-۲۰)).



شکل (۴-۲۱) نمودار تغییرات تابع هدف به تکرار در سیستم ۲.

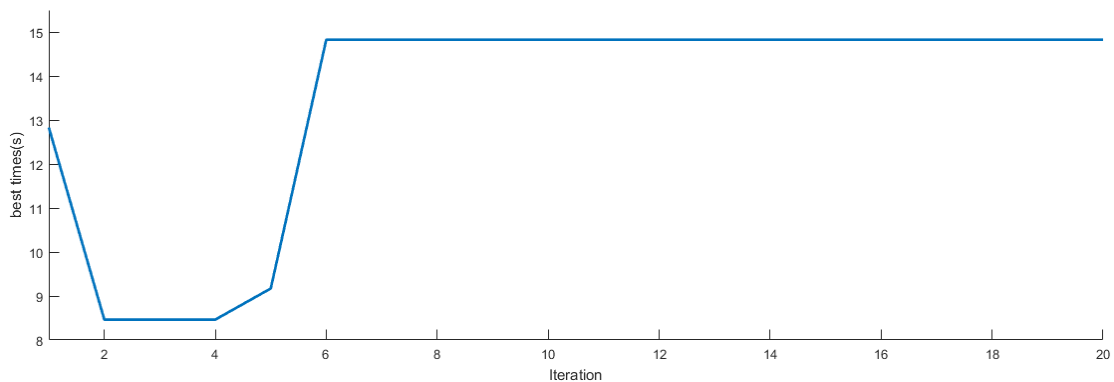
در شکل (۴-۲۱) روند تغییر فشارهای ماکزیمم و مینیمم در هر ترسیم شده‌اند. مشابه با آنچه در مورد سیستم ۱ بیان شد، تابع هدف در این سیستم نیز در هر تکرار تغییر محسوسی ندارد و در تمام تکرارها در حد فشارهای مجاز است. با توجه به نمودار تغییرات فاصله زمانی خاموشی دو گام، می‌توان دریافت که فاصله زمانی مناسب برای خاموشی پمپ‌ها در دوگام عددی منحصر به فرد نیست و عدد حاصل شده یکی از بهترین جواب‌های ممکن است. از جمله زمان‌های مناسب دیگر برای فاصله خاموشی بهینه می‌توان به بازه ۹ و ۱۴ ثانیه نیز اشاره کرد.



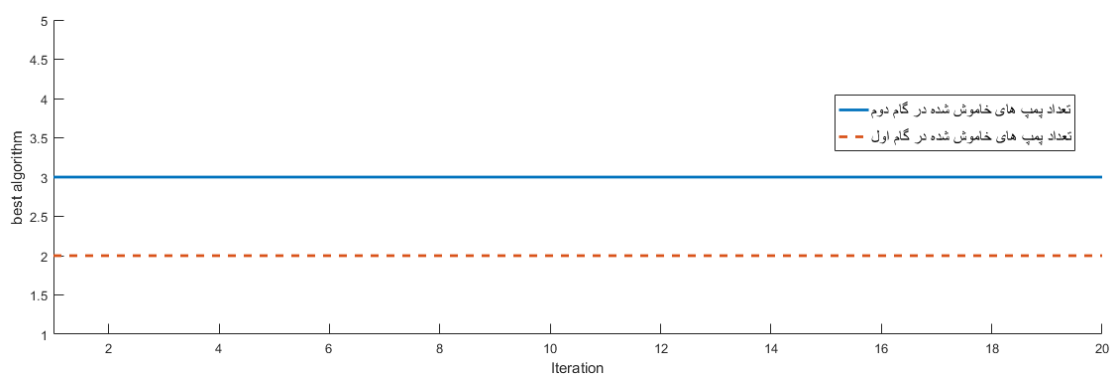
شکل (۴-۲۲) نمودار تغییرات هد فشاری به زمان در سیستم ۲، در مکان‌های $1.0m$ ، $6.0m$ ، $15.0m$ ، $22.5m$ از ابتدای خط لوله.

در شکل (۴-۲۲) نمودار تغییرات هد فشاری در مکان‌های مختلفی از جمله: 1.0 ، 6.0 ، ... متری از ابتدای خط لوله در طول زمان نشان داده شده است. زمان مدل‌سازی طوری انتخاب شده است که تغییرات فشار ناشی از غیرماندگاری جریان در طول لوله، مستهلک شده و در نهایت جریان ماندگار شده است.

سیستم ۳) این سیستم مشابه سیستم ۱ و ۲ است و مشخصات آن در جدول (۴-۴) b- عنوان شده است. در ادامه با بررسی این سیستم پمپاژ نمودار تغییرات فاصله زمانی به تکرار و تغییرات ترتیب خاموشی به تکرار، به ترتیب در شکل (۴-۲۳) و شکل (۴-۲۴) نشان داده شده بهینه در این دو گراف مشهود است و درصد تغییرات در ۱۰ گام نهایی صفر شده است.



شکل (۴-۲۳) نمودار تغییرات فاصله زمانی خاموشی بین دو گام در تکرار برای هر سه ایستگاه در سیستم ۳.

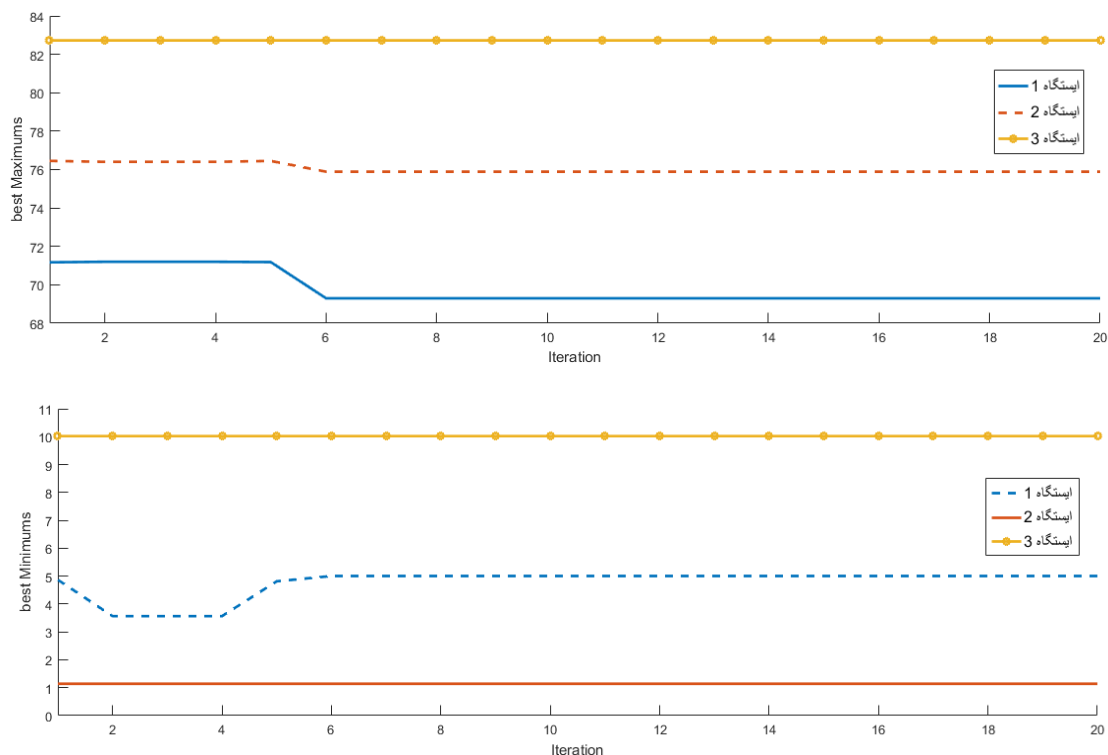


شکل (۴-۲۴) نمودار تغییرات ترتیب خاموشی به تکرار در هر سه ایستگاه در سیستم ۳.

فاصله زمانی بین دو گام خاموشی در گام نهایی ۱۴,۸ ثانیه به دست آمده و ترتیب خاموشی مطابق با شکل (۴-۲۴)، دو پمپ در گام اول و سه پمپ در گام دوم است (این ترتیب برای هر سه ایستگاه در سیستم ۳ است).

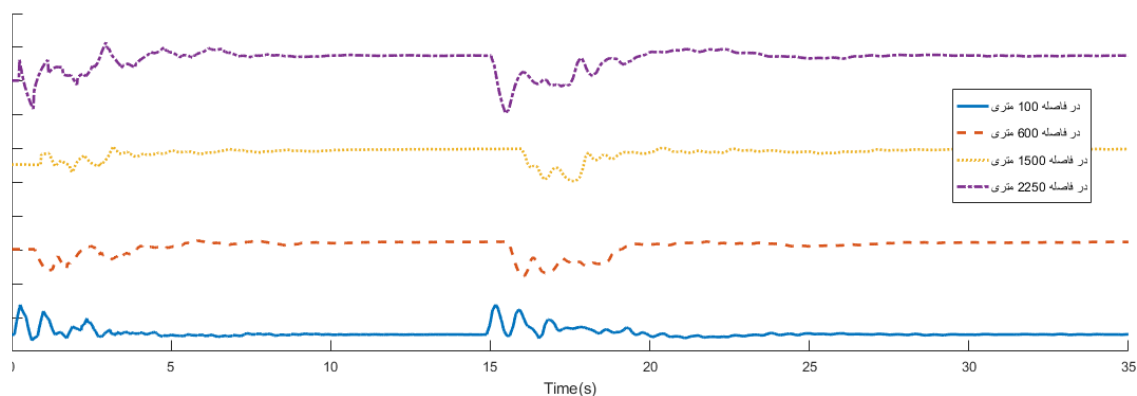
در ادامه در شکل (۴-۲۵) نمودار تغییرات توابع هدف نشان داده شده است. پس از چند تکرار اولیه تمام مقادیر ماکزیمم و مینیمم در هر سه ایستگاه همگرا شده اند و درصد تغییرات در ۱۰ گام نهایی به صفر رسیده است.

تمامی فشارهای ماکزیمم و مینیمم در این سیستم نیز از فشارهای مجاز تجاوز نمی کند. مشابه با موارد قبل، فاصله زمانی بین خاموشی دو گام حاصل شده در این بهینه سازی یکی از بهترین جواب های ممکن است و پاسخ های نزدیک به آن نیز وجود دارد.



شکل (۴-۲۵) نمودار تغییرات تابع هدف به تکرار در سیستم ۳.

در نمودار شکل (۴-۲۶) تغییرات هد فشاری در وسط هر خط لوله نشان داده شده است. لازم به ذکر است فشارهای نشان داده شده در شکل (۴-۲۶) به صورت فشارهایی از سطح مبنا نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۶) نمودار تغییرات هد فشاری به زمان در سیستم ۳، در مکان‌های $100m$ ، $600m$ ، $1500m$ ، $2250m$ از ابتدای خط لوله.

در جدول (۴-۷) مشخصات خاموشی بهینه هر یک از سیستم‌های مورد بررسی بیان شده است. در این جدول مشاهده می‌کنیم که فشارهای ماکزیمم از حداکثر فشار مجاز در لوله‌ها ($120m$) کمتر است

و فشارهای مینیمم همواره با این مشخصات خاموشی از فشار بخار آب ($0,2385 \text{ m}$) بیشتر است و احتمال وقوع کاویتاسیون و خرابی‌های ناشی از آن وجود ندارد. با توجه به سه سیستم همسان مورد بررسی، به نظر می‌رسد که با افزایش قدرت پمپ‌ها تعداد پمپ‌های خاموش شده در گام اول کمتر شده و فاصله زمانی بهینه با توجه به افزایش قدرت پمپ‌ها افزایش می‌یابد.

جدول (۷-۴) مشخصات خاموشی بهینه در سیستم‌های بررسی شده در بخش پمپ‌های همسان.

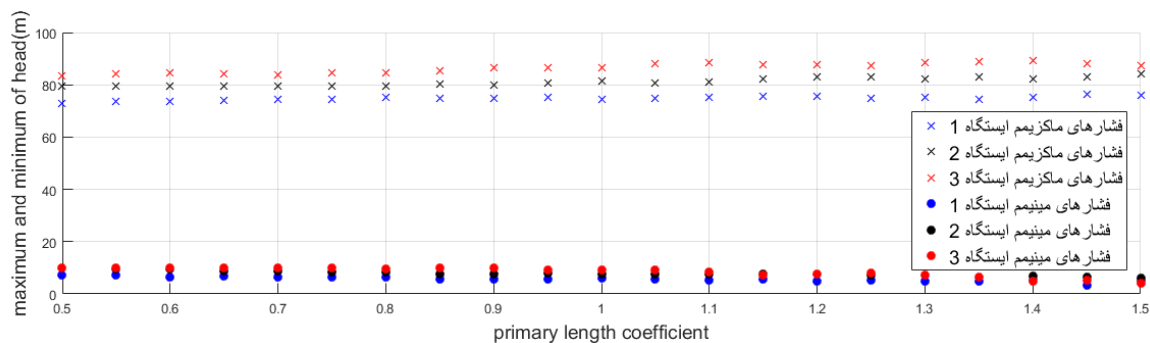
	شماره ایستگاه	تعداد پمپ خاموش شده در گام اول	تعداد پمپ خاموش شده در گام دوم	فاصله زمانی خاموشی بین دو گام (s)	هد فشاری ماکزیمم (m)	هد فشاری مینیمم (m)
سیستم ۱	ایستگاه ۱	۳	۲	۹,۱۸	۷۴,۵۶	۶,۱۳
	ایستگاه ۲	۳	۲	۹,۱۸	۸۱,۲۵	۷,۷۲
	ایستگاه ۳	۳	۲	۹,۱۸	۸۶,۶۱	۹,۳۱
سیستم ۲	ایستگاه ۱	۳	۲	۱۱,۱۶	۷۴,۵۱	۶,۲۰
	ایستگاه ۲	۳	۲	۱۱,۱۶	۷۹,۹۸	۶,۶۸
	ایستگاه ۳	۳	۲	۱۱,۱۶	۸۶,۵۱	۸,۶۶
سیستم ۳	ایستگاه ۱	۲	۳	۱۴,۸۲	۶۹,۲۸	۵,۰۰
	ایستگاه ۲	۲	۳	۱۴,۸۲	۷۵,۸۸	۱,۱۴
	ایستگاه ۳	۲	۳	۱۴,۸۲	۸۲,۷۲	۱۰,۰۲

۴-۵-۱-۱- تأثیر طول لوله‌ها در بهینه‌سازی سیستم پمپ‌های همسان

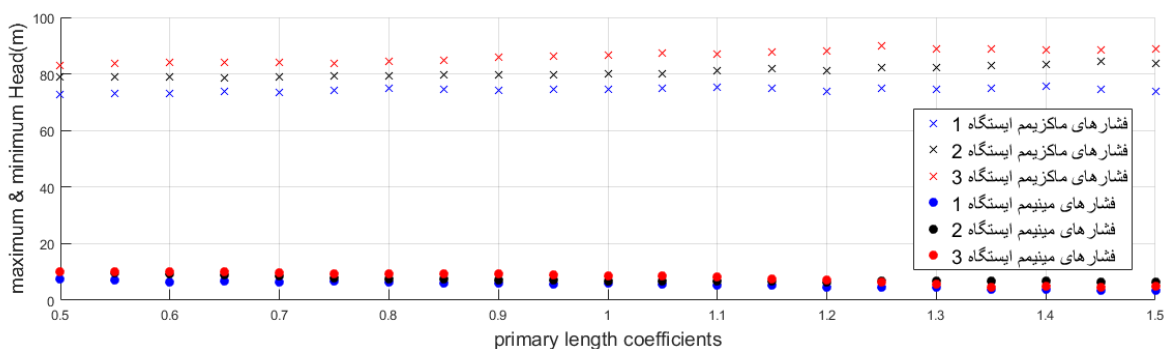
بهینه‌سازی سیستم‌های همسان در بخش قبل، با توجه با طول لوله‌های طرح شماتیک شکل (۴-۴) حاصل شده است. از آن جایی که افزایش و کاهش طول لوله‌ها در فشارهای وارد بر سیستم انتقال آب موثر است، در این بخش به بررسی اثر افزایش و کاهش طول خط لوله‌ها با اندازه ۰,۵ تا ۱,۵ برابر طول اولیه می‌پردازیم.

تغییرات فشار بدین صورت که با افزایش طول لوله‌ها در این سه سیستم، فشارهای مینیمم کاهش و فشارهای ماکزیمم افزایش می‌یابد تا جایی که در اثر افزایش طول لوله‌ها فشار مینیمم از فشار بخار آب کمتر می‌شود. عملکرد سیستم‌های ۱، ۲ و ۳ در شرایط بهینه با افزایش طول لوله، به ترتیب در شکل (۲۷-۴)، شکل (۲۸-۴) و شکل (۲۹-۴) نمایش داده شده است. در این نمودار محور عمودی هد فشاری

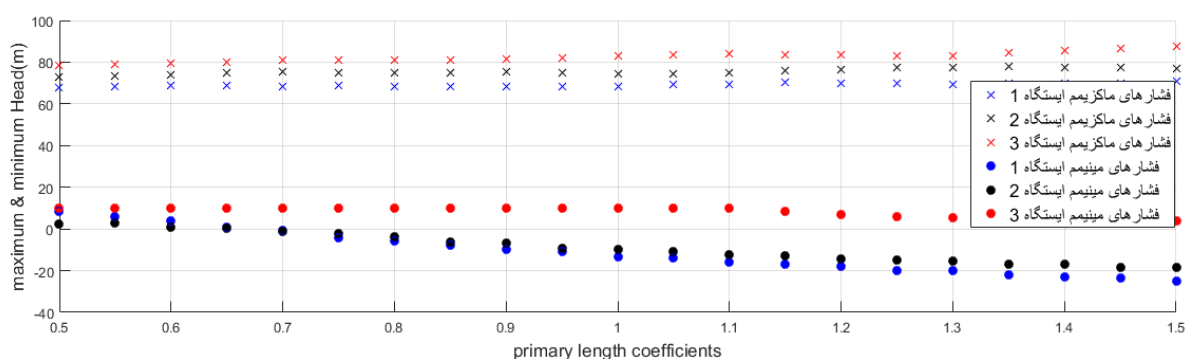
وارد بر سیستم (هد فشاری ماکزیمم و مینیمم) و محور افقی ضرایب طول لوله‌های سیستم‌های ۱، ۲ و ۳ است.



شکل (۴-۲۷) نمودار تغییرات هد فشاری ماکزیمم و مینیمم با کاهش و افزایش طول لوله‌ها در سیستم ۱.



شکل (۴-۲۸) نمودار تغییرات هد فشاری ماکزیمم و مینیمم با کاهش و افزایش طول لوله‌ها در سیستم ۲.



شکل (۴-۲۹) نمودار تغییرات هد فشاری ماکزیمم و مینیمم با کاهش و افزایش طول لوله‌ها در سیستم ۳.

با توجه به شکل (۴-۲۷)، شکل (۴-۲۸) و شکل (۴-۲۹)، مشاهده می‌شود با افزایش طول لوله‌ها به‌اندازه ۱٫۵ برابر طول حاضر در مدل‌سازی فشارهای ماکزیمم افزایش‌یافته و فشارهای مینیمم کاهش

می‌یابد، بالعکس با کاهش طول لوله‌ها به‌اندازه ۰,۵ برای طول اولیه در مدل بهینه‌سازی شده، فشار ماکزیمم کاهش و فشار مینیمم افزایش می‌یابد.

جزئیات اختلاف فشار ایجادشده در طول‌های مختلف در جدول (۴-۸) ارائه شده است. در این جدول علامت مثبت نشان‌دهنده افزایش فشار و علامت منفی به معنای کاهش فشار است. با دقت در این جدول می‌توان ملاحظه نمود که درصد افزایش و کاهش فشار ماکزیمم در اثر افزایش و کاهش طول، چندان زیاد نیست اما افزایش و کاهش فشار مینیمم در اثر کاهش و افزایش طول لوله‌ها بسیار قابل‌ملاحظه و تعیین‌کننده است.

با افزایش قدرت پمپ‌ها در هر سیستم، اثر مخرب تغییر طول در فشارهای مینیمم کاملاً مشهود است. با دقت در جدول (۴-۸) می‌توان دریافت که فشار مینیمم در سیستم ۳ که دارای پمپ‌های قوی‌تری است، با کاهش طول افزایش چشم‌گیر و با افزایش طول افت شدیدی می‌کند، به‌نحوی که با افزایش طول به‌اندازه ۱,۵ برابر طول اولیه فشارهای مینیمم کمتر از فشار بخار آب خواهد شد.

درمجموع کاهش طول لوله‌ها را می‌توان ایمن معرفی کرد و افزایش طول لوله‌ها تا محدوده مشخصی (برای مثال ۱,۵ برابر طول استفاده‌شده در بهینه‌سازی) در پمپ‌های ضعیف در محدوده ایمن قرار می‌گیرند اما برای اظهارنظر دقیق بخصوص در مورد پمپ‌های قوی، نیازمند بررسی بیشتر هستند.

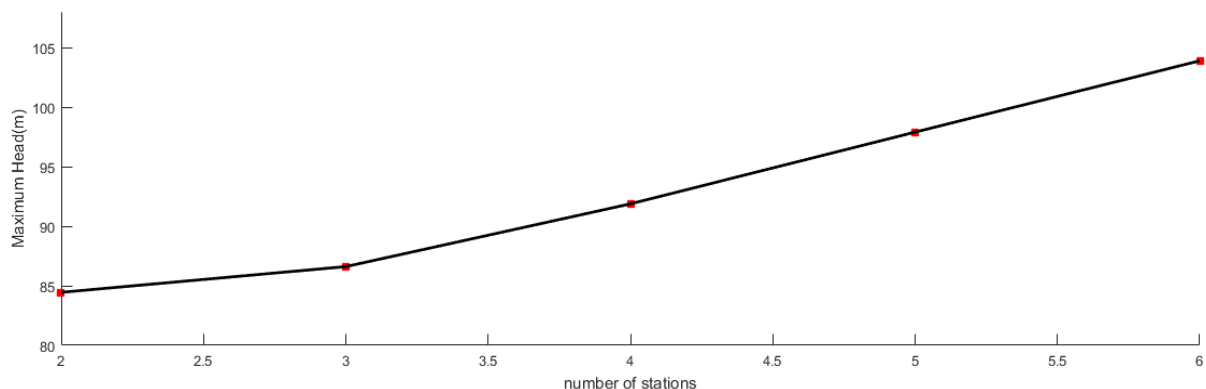
جدول (۴-۱) درصد اختلاف فشار ماکزیمم و مینیمم با ۰,۵ و ۱,۵ برابر طول بررسی شده در بهینه‌سازی برای سیستم‌های ۳,۱ و ۲.

شماره سیستم	شماره ایستگاه	اختلاف فشار ماکزیمم در طول بررسی شده برای بهینه‌سازی و ۰,۵ برابر این طول (%)	اختلاف فشار ماکزیمم در طول بررسی شده برای بهینه‌سازی و ۱,۵ برابر این طول (%)	اختلاف فشار مینیمم در طول بررسی شده برای بهینه‌سازی و ۰,۵ برابر این طول (%)	اختلاف فشار مینیمم در طول بررسی شده برای بهینه‌سازی و ۱,۵ برابر این طول (%)
سیستم ۱	ایستگاه ۱	-۲,۲۳	۱,۹۲	۱۸,۱۳	-۲۳,۰۳
	ایستگاه ۲	-۲,۱۶	۳,۶۶	۳۰,۲۳	-۱۹,۴۷
	ایستگاه ۳	-۳,۵۳	۰,۶۵	۷,۹۶	-۵۴,۹۷
سیستم ۲	ایستگاه ۱	-۲,۶۰	-۱,۰۷	۲۰,۱۵	-۴۳,۴۹
	ایستگاه ۲	-۱,۵۱	۴,۶۶	۵۰,۳۹	-۳,۴۴
	ایستگاه ۳	-۳,۹۸	۲,۶۲	۱۵,۹۷	-۴۱,۴۴
سیستم ۳	ایستگاه ۱	-۱,۵۲	۴,۸۷	۷۳,۰۰	-۲۰۴,۶
	ایستگاه ۲	-۳,۳۵	۳,۱۵	۱۱۹,۲۹	-۸۴۴,۷۳
	ایستگاه ۳	-۵,۵۱	۶,۱۶	۰,۰۰۰۳	-۶۳,۳۷

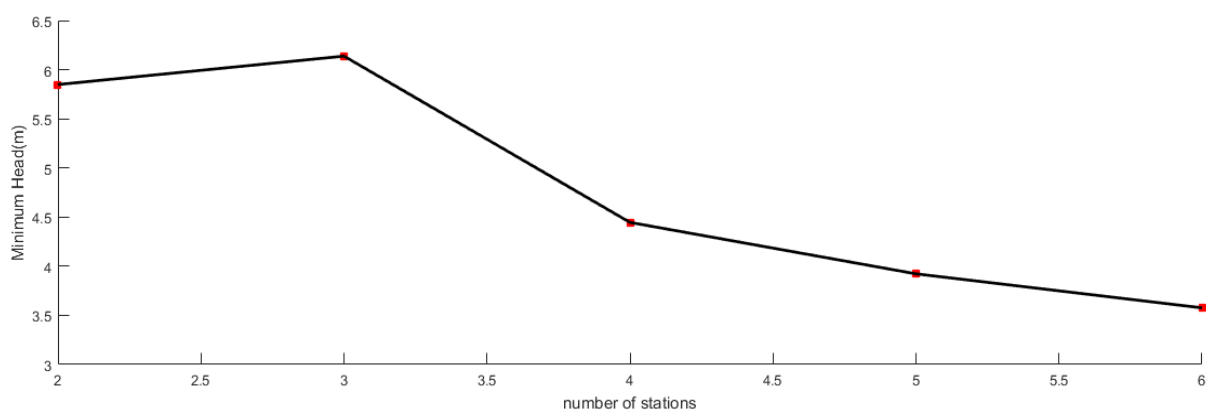
۴-۵-۱-۲- تاثیر تغییر تعداد ایستگاه پمپاژ

نتایج بهینه‌سازی، برای مدل مشخصی از سیستم پمپاژ است حاصل شده است. حال این سوال پیش می‌آید که آیا متغیرهای بهینه استخراج شده، برای سیستم‌های پمپاژ گسترده‌تری نیز کاربرد دارند؟ بدین منظور، سیستم‌های پمپاژ مختلفی مشابه با مدل بهینه‌شده در نظر گرفته شده و تنها تعداد ایستگاه پمپاژ در این سیستم‌ها متفاوت است.

در سیستم‌هایی که تعداد ایستگاه افزایش یافته، طول لوله و اختلاف ارتفاع بین دو ایستگاه مشابه با ایستگاه ۲ و ۳ در سیستم اصلی است (طول لوله ۱۰۰۰ متر و اختلاف ارتفاع بین دو ایستگاه ۵۰ متر). در نمودارهای شکل (۴-۳۰) و شکل (۴-۳۱)، به ترتیب تغییرات هد فشاری ماکزیمم و مینیمم را نشان می‌دهند و محور افقی این نمودارها، تعداد ایستگاه پمپاژ در سیستم انتقال آب است (قدرت پمپ‌ها مشابه سیستم ۱ در نظر گرفته شده است).



شکل (۴-۳۰) نمودار تغییرات فشار ماکزیمم کل سیستم انتقال آب با تغییر تعداد ایستگاه‌های پمپاژ.



شکل (۴-۳۱) نمودار تغییرات فشار مینیمم کل سیستم انتقال آب با تغییر تعداد ایستگاه‌های پمپاژ.

با افزایش تعداد ایستگاه‌های پمپاژ، فشار ماکزیمم وارد بر سیستم انتقال آب (شکل (۴-۳۰) را ببینید) به‌طور چشم‌گیری از ۸۶,۶ متر در سیستم بهینه‌سازی شده به مقدار ۱۰۳,۸۸ متر در سیستمی با ۶ ایستگاه افزایش یافته است. فشار مینیمم وارد بر خط انتقال (شکل (۴-۳۱) را ببینید) نیز با افزایش تعداد ایستگاه‌های پمپاژ، از مقدار ۶,۱۴ متر در سیستم پمپاژ بهینه‌سازی شده به مقدار ۳,۵۸ متر در سیستم ۶ کاهش می‌یابد.

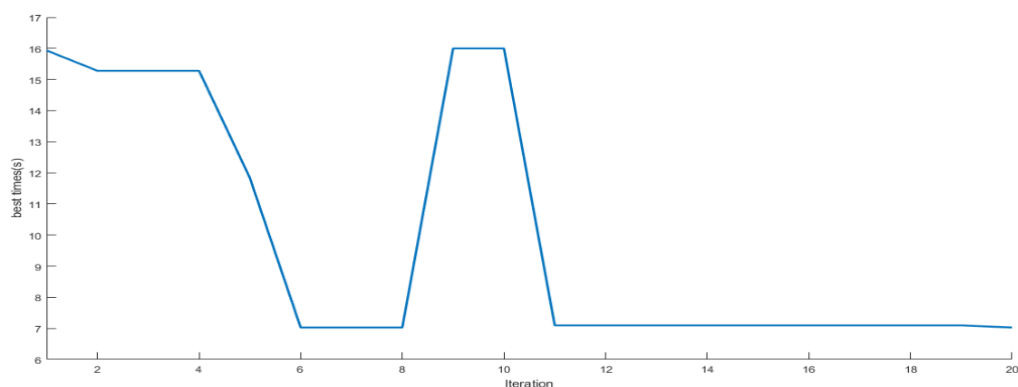
هم‌چنین با کاهش تعداد ایستگاه‌های پمپاژ فشار ماکزیمم به میزان ۲,۱۶ متر کاهش و فشار مینیمم نیز به مقدار ۰,۳ متر کاهش می‌یابد (این میزان کاهش نسبت به فشارهای بهینه‌سازی شده در سیستم پمپاژ همسان رخ داده است).

با توجه به نمودارهای ارائه شده در می‌یابیم با افزایش تعداد ایستگاه‌های پمپاژ (به‌طور مشابه و با طول فرض شده)، فشارهای ماکزیمم در مجموع افزایش و فشارهای مینیمم در مجموع کاهش می‌یابد اما هم‌چنان در محدوده‌ی فشارهای مجاز باقی می‌ماند.

نتیجه‌گیری کلی این بخش بدین صورت است که نتایج حاصل در این بخش را نمی‌توان به‌عنوان فشارهای بهینه‌سازی شده در سیستم‌هایی با تعداد ایستگاه پمپاژ متفاوت ارائه داد. اما با استفاده از متغیرهای بهینه‌شده (فاصله زمانی بین دو گام خاموشی و ترتیب خاموشی) در سیستم همسان با سه ایستگاه پمپاژ، می‌توان نتایجی مطلوب در سیستم‌های مشابه گرفت.

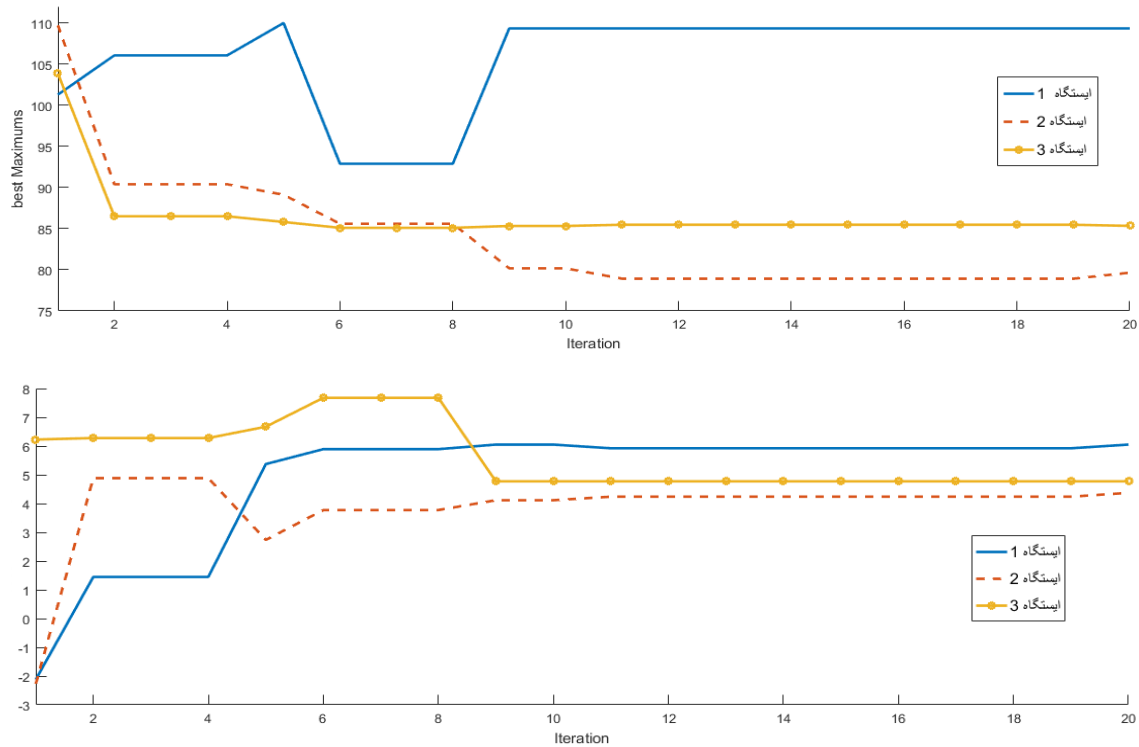
۴-۵-۲- بهینه‌سازی سیستم انتقال آب با پمپ‌های ناهمسان

در این بخش، سیستم‌های انتقال پمپ‌دار متشکل از چند ایستگاه پمپاژ است که در هر ایستگاه چند پمپ ناهمسان و متفاوت قرار دارد. طول لوله‌ها و سایر جزئیات در این طرح در شکل (۴-۴) مشخص شده است. مشابه با سایر سیستم‌های مورد بررسی، به این سیستم خاموشی گام‌به‌گام اعمال شده و با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم، فاصله زمانی بین دو گام خاموشی و ترتیب خاموشی پمپ‌ها به دست آمده است. مشخصات هر یک پمپ‌ها در جدول (۴-۴) ارائه گردیده است. هر ایستگاه متشکل از دو پمپ a و یک پمپ b و c است و در هر ایستگاه چیدمان متفاوتی دارند. نمودار تغییر فاصله زمانی بین دو گام در شکل (۴-۳۲) ارائه شده است.



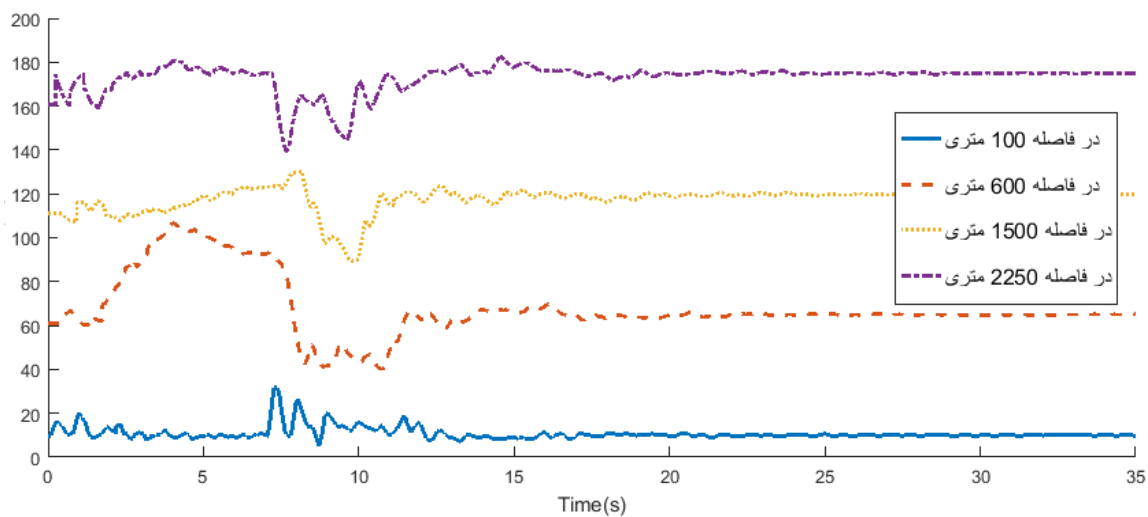
شکل (۴-۳۲) نمودار تغییرات ترتیب خاموشی به تکرار در هر سه ایستگاه در سیستم ناهمسان.

در شکل (۴-۳۳) نمودار تغییرات تابع هدف در سیستم ناهمسان ارائه شده است. فشار مینیمم و ماکزیمم سیستم را در دو نمودار جداگانه ارائه گردیده است. از آنجایی که توابع هدف بر اساس بیشترین فشار مینیمم طبقه‌بندی شده‌اند، می‌توان مشاهده نمود که در گذر تکرار، فشار مینیمم دست‌خوش افزایش شده است.



شکل (۴-۳۳) نمودار تغییرات تابع هدف به تکرار در سیستم ناهمسان.

در شکل (۴-۳۳) مشاهده می‌شود که در ۱۰ گام نهایی درصد تغییرات کمتر از ۳ درصد است و قید موردنظر نیز رعایت شده است. در شکل (۴-۳۴) نمودار تغییرات هد فشاری به زمان ترسیم شده است که هد فشاری در این نمودار از سطح مبنا هست.



شکل (۴-۳۴) نمودار تغییرات هد فشاری به زمان در سیستم ناهمسان، در مکان‌های $1.0m$ ، $6.0m$ ، $15.0m$ ،

$225.0m$ از ابتدای خط لوله.

جزئیات خاموشی سیستم پمپاژ شامل تعداد پمپ‌های خاموش شده در هر گام و مشخصات آن در هر ایستگاه، فاصله زمانی بین دو گام خاموشی، هد فشاری ماکزیمم و مینیمم در این حالت بهینه در جدول (۹-۴) نشان داده شده است.

جدول (۹-۴) مشخصات بهینه خاموشی سیستم پمپاژ ناهمسان.

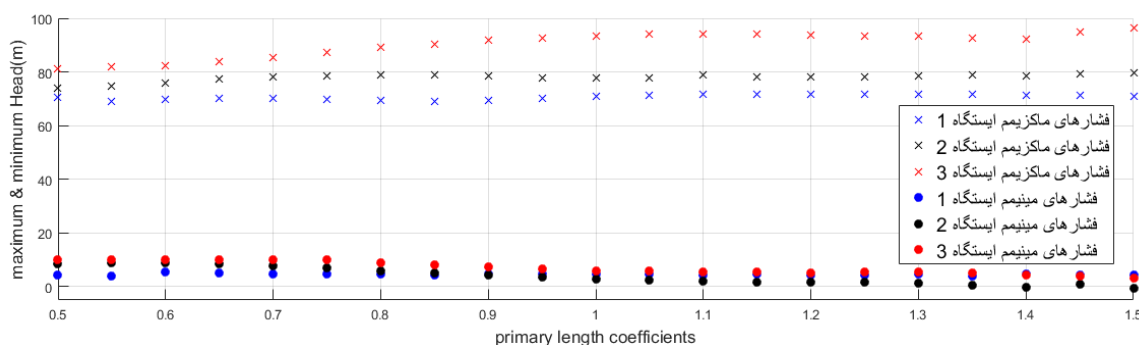
پمپ‌های خاموش شده در گام اول	پمپ‌های خاموش شده در گام دوم	فاصله زمانی بین دو گام (s)	هد فشاری ماکزیمم (m)	هد فشاری مینیمم (m)	
a-c	a-b	۷,۰۳	۱۰۹,۳۷	۶,۰۵	ایستگاه ۱
a-a-c	b	۷,۰۳	۷۹,۶۴	۴,۳۷	ایستگاه ۲
a-a	b-c	۷,۰۳	۸۵,۳۳	۴,۷۷	ایستگاه ۳

باتوجه به جدول (۹-۴) ملاحظه می‌شود که بین پمپ‌های خاموش شده در هر گام خاموشی تعادلی (از لحاظ قدرت پمپ‌ها) برقرار است و ترجیح بر آن است که مجموعه پمپ‌های خاموش شده در گام دوم، مجموعه‌ی قوی‌تر باشد.

۴-۵-۲-۱- تاثیر طول لوله‌ها در بهینه‌سازی سیستم پمپ‌های ناهمسان

بهینه‌سازی سیستم ناهمسان در بخش قبل، با توجه با طول لوله‌های طرح شماتیک شکل (۴-۴) حاصل شده است. از آنجایی که افزایش و کاهش طول لوله‌ها در فشارهای وارد بر سیستم انتقال آب موثر است، در این بخش به بررسی اثر افزایش و کاهش طول خط لوله‌ها با اندازه ۰,۵ تا ۱,۵ برابر طول اولیه می‌پردازیم.

در شکل (۴-۳۵) تغییرات هد فشاری ماکزیمم و مینیمم در هر ایستگاه ترسیم شده است. محور افقی این نمودار ضرایب طول اولیه (طول مورد استفاده در مدل بهینه‌سازی) است به‌طوری‌که طول لوله‌ها به نسبت این ضرایب افزایش و کاهش یافته است. با توجه به نمودار شکل (۴-۳۵)، با کاهش طول لوله‌ها فشار ماکزیمم کاهش و فشار مینیمم افزایش می‌یابد (این شرایط مطلوب است) اما با افزایش طول لوله‌ها، فشار ماکزیمم افزایش و فشار مینیمم کاهش می‌یابد.



شکل (۴-۳۵) نمودار تغییرات هد فشاری ماکزیمم و مینیمم با کاهش و افزایش طول لوله‌ها در سیستم ناهمسان.

همان‌طور که در شکل (۴-۳۵) مشاهده می‌شود، فشار مینیمم، درازای طول ۱,۳ برابر طول اولیه و بیشتر، کمتر از صفر می‌شود. برای بررسی جزئیات اختلاف فشار، اختلاف فشار ماکزیمم و مینیمم طول اولیه و طول‌های ۰,۵ و ۱,۵ برابر طول اولیه، در جدول (۴-۱۰) ارائه شده است. در این جدول علامت مثبت نشان‌دهنده افزایش فشار و علامت منفی نشان‌دهنده کاهش فشار است.

باتوجه به جدول (۴-۱۰) مشاهده می‌شود که با کاهش طول لوله‌ها به اندازه ۰,۵ برابر طول اولیه، فشارهای ماکزیمم کاهش و فشارهای مینیمم افزایش می‌یابند. اما با افزایش طول لوله‌ها به اندازه ۱,۵ برابر طول اولیه، فشارهای ماکزیمم کمی افزایش و فشارهای مینیمم به شدت کاهش یافته‌اند. کاهش ۱۲۳ درصدی فشار در ایستگاه دوم، فشار مینیمم را به کم‌تر از فشار بخار آب کاهش دهد.

جدول (۴-۱۰) درصد اختلاف فشار ماکزیمم و مینیمم با ۰,۵ و ۱,۵ برابر طول بررسی شده در بهینه‌سازی برای سیستم ناهمسان.

شماره سیستم	شماره ایستگاه	اختلاف فشار ماکزیمم در طول بررسی شده برای بهینه‌سازی و ۰,۵ برابر این طول (%)	اختلاف فشار ماکزیمم در طول بررسی شده برای بهینه‌سازی و ۱,۵ برابر این طول (%)	اختلاف فشار مینیمم در طول بررسی شده برای بهینه‌سازی و ۰,۵ برابر این طول (%)	اختلاف فشار مینیمم در طول بررسی شده برای بهینه‌سازی و ۱,۵ برابر این طول (%)
سیستم ناهمسان	ایستگاه ۱	-۰,۳۹	۰,۰۹۵	-۸,۰۸	-۱۰,۷۹
	ایستگاه ۲	-۴,۹۳	۲,۲۵	۲۱۴,۰۳	-۱۲۳,۶۴
	ایستگاه ۳	-۱۳,۱۶	۲,۹۹	۷۰,۳۴	-۴۷,۶۹

در پمپ‌های ناهمسان، همانند آن‌چه در پمپ‌های همسان رخ داد، کاهش طول لوله‌ها اثر مساعدی روی فشارهای ماکزیمم و مینیمم وارد بر خط انتقال آب دارد. اما افزایش طول لوله به شدت چالش برانگیز است و صحت عملکرد صحیح سیستم پمپاژ، در این شرایط باید به‌طور موردی بررسی شود.

فصل پنجم: خلاصه،

نتیجه‌گیری و ارائه

پیشنهادات

۵-۱- خلاصه

در ابتدا به طور اجمالی مسائل مرتبط با ضربه قوچ، خاموشی پمپ‌ها و معادلات حاکم بر آن و الگوریتم بهینه‌ساز معرفی گردید. سپس در راستای اهداف پایان‌نامه، برای ارائه مدل شبیه‌ساز سیستم خط لوله پمپ‌دار، جریان ماندگار و غیرماندگار ناشی از ضربه قوچ در سیستم پمپاژ موازی بررسی گردید. برای این منظور روابط حاکم بر پمپ‌های موازی، روابط حاکم بر جریان غیرماندگار و منحنی مشخصه پمپ‌ها ارائه شد و شرایط اولیه و روابط شرایط مرزی استخراج گردید. همچنین تولید جمعیت اولیه در الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم، تولیدمثل و نرخ آن و ... به صورت کامل تشریح شده و نحوه فرمول‌بندی آن بیان شده است.

معادلات حاکم بر حرکت سیال در جریان غیرماندگار با استفاده از روش خطوط مشخصه صریح و معادلات غیرخطی حاکم بر پمپ‌ها با روش عددی نیوتن رافسون در هر گام زمانی حل می‌شوند. در گام بعدی، قبل از ارائه مدل شبیه‌ساز به الگوریتم بهینه‌ساز، این مدل عددی با مدلی آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده است. در نهایت مدل شبیه‌ساز به صورت تابعی به الگوریتم بهینه‌ساز معرفی شده و پس از تعداد محدودی تکرار، تابع هدف (فشار ماکزیمم و مینیمم در خط لوله) بهینه‌شده و متغیرهای بهینه مربوط به آن به عنوان خروجی مساله ارائه شده است. در ادامه بسط این بهینه‌سازی برای طول‌های مختلفی از سیستم مورد بررسی صورت گرفته است.

۵-۲- نتیجه‌گیری

پس از بررسی‌ها و مطالعاتی که در زمینه رفتار پمپ‌ها و بهینه‌سازی آن‌ها در حالت غیرماندگار انجام شد، نتایج کلی زیر حاصل گردید که به صورت جداگانه ارائه می‌شود. جهت مشاهده نتایج جزئی‌تر می‌توان به تفسیرهای ارائه شده برای اشکال رسم شده در فصل پنجم مراجعه نمود.

۵-۲-۱- خاموشی پمپ‌های همسان در سیستم انتقال آب

در این سیستم اهمیت ترتیب خاموشی پمپ‌ها و فاصله زمانی خاموشی بین دو گام نشان داده شده است. انتخاب ترتیب خاموشی نامناسب می‌تواند باعث تجاوز فشارهای وارد بر خط لوله از فشار مجاز شود. همچنین اثر هم‌زمان فاصله زمانی خاموشی بین دو گام بررسی شده است. در این بخش می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب ترتیب مناسب برای خاموشی پمپ‌ها در یک سیستم بزرگ و همچنین فاصله زمانی مناسب برای خاموشی بین دو گام، با آزمون و خطا و بررسی موردی، امکان‌پذیر نیست و برای یافتن فشارهای ماکزیمم و مینیمم بهینه، نیازمند بررسی حالات مختلف با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌ساز هستیم.

۵-۲-۲- اثر تغییر طول لوله‌های بین ایستگاه‌های پمپاژ

با کم کردن طول لوله‌های بین ایستگاه‌های پمپاژ و پخش کردن این طول در لوله مکش و رانش، مشاهده می‌شود که فشار مینیمم در این سیستم، در مقایسه با سیستم پمپاژ گروهی که بین ایستگاه‌های پمپاژ آن لوله‌هایی با طول قابل توجه دارند، بسیار کمتر است. در نمودارهای ارائه شده تشدید فشارهای مینیمم و ماکزیمم وارد شده در طول لوله و در چند زمان خاص بررسی شده و بنا به نتایج حاصل شده، سیستم پمپاژی که بین ایستگاه‌های آن لوله‌های با طول قابل توجه قرار دارند برای ادامه تحقیقات انتخاب شده است.

۵-۲-۳- خاموشی پمپ‌های ناهمسان در سیستم انتقال آب

مشابه با قسمت قبل که اهمیت متغیرهای بهینه، در فشارهای ماکزیمم و مینیمم را بیان می‌کند، هدف این قسمت نیز تاکید بر اهمیت این متغیرها در پمپ‌های ناهمسان است. با توجه به نمودارهای ارائه شده، ترتیب خاموشی پمپ‌های ناهمسان می‌تواند اثر شدیدی بر فشارهای وارد بر سیستم انتقال آب داشته باشد. همان‌طور که در نمودارها نشان داده شده است، تنها با تغییری کوچک در یکی از ایستگاه‌ها فشار وارد بر سیستم پمپاژ تغییر محسوسی خواهد داشت.

۵-۲-۴- بهینه‌سازی سیستم انتقال آب همسان

یک سیستم انتقال آب بزرگ برای خاموشی گام به گام، به ترتیب و فاصله زمانی مناسب احتیاج دارد. این فاصله زمانی با افزایش قدرت پمپ‌ها افزایش می‌یابد. هم‌چنین در با افزایش قدرت پمپ‌ها در سیستم پمپاژ، تعداد پمپ‌های خاموش شده در گام دوم افزایش می‌یابد.

دو متغیر بهینه بررسی شده در این تحقیق به شدت به طول خط لوله‌ها، قدرت پمپ‌ها، تعداد پمپ و تعداد ایستگاه وابسته‌اند. به همین دلیل امکان ارائه یک الگوی کلی امکان پذیر نیست. مهم‌ترین نتیجه در این بخش این است که فاصله زمانی خاموشی بین دو گام (به ازای یک ترتیب خاموشی خاص) منحصر به فرد نیست و می‌توان بازه زمانی ارائه داد که با انتخاب زمان خاموشی از این بازه، می‌توان اطمینان حاصل کرد که فشارهای وارد بر خط لوله و تاسیسات را در محدوده مجاز و بی‌خطر باقی می‌ماند (توجه شود که فشارهای وارد بر سیستم در این بازه نزدیک به فشار بهینه شده است؛ یعنی بهترین جواب کماکان منحصر به فرد است اما به دلیل اختلاف کم این بازه و ارضا هدف اصلی بهینه‌سازی، قابل قبول است).

هم‌چنین این بازه ارائه شده، برای سیستم پمپاژی با تعداد پمپ و ایستگاه‌های مشابه اما با پمپ‌هایی با قدرت‌های متفاوت، تقریباً نزدیک به هم است.

۵-۲-۵- تاثیر تغییر طول لوله بر نتایج بهینه‌سازی پمپ‌های همسان

در این بخش با بررسی‌هایی محدود، سعی شده است که میزان تاثیر تغییر طول لوله‌ها بر فشارهای وارد بر سیستم بررسی شود. در یک سیستم معین، با افزایش طول لوله‌ها (چه با افزایش و چه با کاهش طول لوله‌ها، از مشخصات متغیرهای بهینه‌شده استفاده شده است)، فشارهای مینیمم افزایش و فشارهای ماکزیمم کاهش یافته است. هرچقدر قدرت پمپ‌ها بیشتر شده، این روند تسریع می‌شود بدین معنی که فشار ماکزیمم و مینیمم سریع‌تر به سمت فشارهای مخرب رشد می‌کنند. اظهار نظر دقیق در مورد این که

فشارهای وارده بر سیستم انتقال تا چند برابر طول اولیه می‌تواند در محدوده مجاز بماند بسته به قدرت پمپ متغیر است و برای چند نمونه محدود در فصل پنجم بحث شده است.

با کاهش طول لوله، فشارهای ماکزیمم کاهش و فشارهای مینیمم افزایش می‌یابد. این روند در سیستم‌های معینی با قدرت پمپ‌های متفاوت بررسی شد و تمام بررسی‌ها این نتیجه‌گیری را تایید کرد. سرعت تغییر فشارهای وارد بر خط لوله و تاسیسات، بسته به قدرت پمپ متفاوت است.

۵-۲-۶- اثر تغییر تعداد ایستگاه پمپاژ

با تغییر تعداد ایستگاه پمپاژ در یکی از سیستم‌های بهینه‌سازی شده در بخش پمپ‌های همسان (سیستم ۱)، صحت عملکرد سیستم پمپاژ گروهی با استفاده از متغیرهای بهینه شده بررسی شده است. نتایج بدین ترتیب می‌باشد که با استفاده از متغیرهای بهینه شده در بخش پمپ‌های ناهمسان، سیستم‌های مشابه (تنها تعداد ایستگاه‌های پمپاژ افزایش و کاهش یافته) در محدوده ایمن باقی مانده‌اند. اما نمی‌توان از نتایج این بخش نتیجه‌گیری کرد که این متغیرها (متغیرهای بهینه‌سازی شده در بخش پمپ‌های همسان) در سایر سیستم‌های مشابه (سیستم‌های پمپاژی که در آن تعداد ایستگاه‌های پمپاژ افزایش یا کاهش یافته) منجر به بهینه شدن تابع هدف می‌شوند (مقصود بهینه‌شدن در این جا یعنی کمترین مقدار ممکن برای فشار ماکزیمم و بیشترین مقدار ممکن برای فشار مینیمم است).

۵-۲-۷- بهینه‌سازی سیستم انتقال آب ناهمسان

این بخش مشابه بهینه‌سازی سیستم انتقال آب همسان است. با این تفاوت که اثر ناهمسان بودن پمپ‌ها در فشارهای وارد بر سیستم پمپاژ بیشتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نمودارهای ارائه شده در این بخش، مشاهده می‌شود که جواب‌هایی نزدیک به توابع هدف بهینه ارائه شده در این بخش وجود دارند. این بدان معنا است که بازه‌ایی از متغیرهای بهینه وجود دارند، که با خاموشی پمپ‌ها در این بازه، می‌توان از اثرات منفی ضربه قوچ جلوگیری کرد. با این وجود بهترین جواب ممکن، کماکان منحصربه‌فرد است و استفاده از این جواب در اولویت قرار دارد. چراکه علاوه بر اطمینان از عملکرد ایمن سیستم

پمپاژ، می‌توانیم از صحت عملکرد سیستم پمپاژ تا حدی اطمینان حاصل کنیم. این مورد در بخش بعد نتیجه‌گیری شده است.

۵-۲-۸- تاثیر تغییر طول لوله بر نتایج بهینه‌سازی پمپ‌های ناهمسان

با تغییر طول اولیه (طولی که در بهینه‌سازی مورد استفاده واقع شد) به نسبت ضرایب خاصی، فشارهای ماکزیمم و مینیمم خط لوله نیز دست‌خوش تغییر می‌شوند. بدین ترتیب که با کاهش طول لوله فشارهای ماکزیمم کاهش و فشارهای مینیمم افزایش می‌یابند که اثری مطلوب بر سیستم پمپاژ است. اما با افزایش طول لوله‌ها فشار ماکزیمم افزایش و فشار مینیمم کاهش می‌یابد.

قابل ذکر است که نرخ تغییرات فشار ماکزیمم با افزایش یا کاهش طول، کم بوده، و باعث ایجاد خطر نمی‌شود اما میزان تغییرات فشار مینیمم با افزایش یا کاهش طول لوله شدید بوده، به نحوی که با افزایش طول لوله به میزان ۱,۳ برابر طول لوله اولیه، فشار مینیمم از میزان مجاز فشار بخار آب کمتر شده و احتمال وقوع کاویتاسیون به وجود می‌آید.

کاهش طول لوله در سیستم ناهمسان ایمن محسوب شده اما افزایش طول لوله حساسیت بیشتری دارد و باید به‌طور موردی بررسی شود.

۵-۳- پیشنهادات برای ادامه کار

با توجه بر این که ضربه قوچ ناشی از خاموشی پمپ و بهینه‌سازی فشار در سیستم پمپاژ گروهی، وسعت و زمینه‌های زیادی برای تکمیل دارد و روش‌ها و فرضیات مورد استفاده در این تحقیق، تنها گام کوچکی در این زمینه به حساب می‌آید، برخی از تحقیقاتی که می‌تواند در روند تکمیل مطالعات، بررسی گردد، به اختصار بیان می‌شود.

- معادلات حل شده در بخش شبیه‌سازی سیستم انتقال آب پمپ‌دار، معادلات ضربه قوچ کلاسیک است. با حل معادلات ضربه قوچ با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال و سپس بهینه‌سازی سیستم پمپاژ گروهی، می‌توان این مطالعه را گسترش داد.

- این تحقیق با فرض الاستیک بودن خط لوله به بررسی رفتار جریان و سپس بهینه‌سازی آن پرداخته است، می‌توان با در نظر گرفتن جنس لوله ویسکوالاستیک به ادامه این بهینه‌سازی پرداخت.
- این تحقیق در حوزه زمان صورت گرفته است، می‌توان مدل‌سازی مشابهی در حوزه فرکانس انجام داد. همچنین مدل بهینه‌ساز را روی این مدل شبیه‌ساز حوزه فرکانس پیاده کرد و مقایسه‌ای با حوزه زمانی انجام شده انجام داد.
- در این تحقیق اثر سرعت باز و بسته شدن دریچه‌ها (شیرهای بعد پمپ) در نظر گرفته نشده است، با در نظر گرفتن سرعت باز و بسته شدن دریچه، بهینه‌سازی انجام داد.
- می‌توان متغیرهای بهینه دیگری از جمله قطر، طول و ضخامت لوله و ... را در بهینه‌سازی در نظر گرفت.
- استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌ساز دیگر در فرآیند بهینه‌سازی و مقایسه نتایج حاصل از این بهینه‌سازی با سایر الگوریتم‌های بهینه‌ساز از لحاظ دقت، سرعت و ... پیشنهاد می‌شود.

پیوست

الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم

در این پیوست نحوه برنامه‌نویسی الگوریتم بهینه‌ساز علف‌های هرز مهاجم در نرم‌افزار متلب ارائه

گردیده است.

```
CostFunction = @(x,y) complexparallel(x,y); % Objective Function
nVar = 1; % Number of Decision Variables
VarSize = [1 nVar]; % Decision Variables Matrix Size (sut down patern)
VarMin = 0; % Lower Bound of Decision Variables (sut down patern)
VarMax = 1; % Upper Bound of Decision Variables (invernal)
TVarMin = 7.5; % Lower Bound of Decision Variables (invernal)
TVarMax = 15; % Upper Bound of Decision Variables
nPop0 = 50; % Initial Population Size
nPop = 80; % Maximum Population Size
Smin = 1; Smax = 4;
MaxIt=20;
Exponent = 3; % Variance Reduction Exponent
sigma1_initial = 0.3; % Initial Value of Standard Deviation (sut down patern)
sigma2_initial = 0.7; % Initial Value of Standard Deviation (invernal)
sigma_final = 0.001; % Final Value of Standard Deviation

nu_gr=3; % number of pumping station
nu_p=5; % number of pump in a group
%% Initialization
% Empty Plant Structure
empty_plant.Position = [];
empty_plant.Time = [];
empty_plant.Max = [];
empty_plant.Min = [];
pop = repmat(empty_plant, nPop0, 1); % Initial Population Array

for i = 1:numel(pop)
    % Initialize Position
    pop(i).Position = position(nu_gr, nu_p); % number of on pumps
    ng=ones(1, nu_gr);
    pop(i).Time = ng.*unifrnd(TVarMin, TVarMax);
    % Evaluation
    [pop(i).Max, pop(i).Min] =CostFunction(pop(i).Position, pop(i).Time);
end

% Initialize Best Cost History
BestMax = zeros(MaxIt,nu_gr);
BestMin = zeros(MaxIt,nu_gr);
BestTime = zeros(MaxIt,nu_gr);
BestPosition = zeros(nu_gr*MaxIt, nu_p);
```

```

%% IWO Main Loop
for it = 1:MaxIt

    % Update Standard Deviation
    sigma1 = ((MaxIt - it)/(MaxIt - 1))^Exponent * (sigma1_initial -
sigma_final)+sigma_final;
    sigma2 = ((MaxIt - it)/(MaxIt - 1))^Exponent * (sigma2_initial -
sigma_final)+sigma_final;
    % Get Best and Worst Cost Values
    mx = (reshape([pop.Max]',nu_gr,[]));
    mn = (reshape([pop.Min]',nu_gr,[]));
    % penalti
    for x=1:length(mx)
        for j=1:nu_gr
            if mx(x,j)>=120
                mx(x,:)=mx(x,)*5;
                if min(mn(x,:))>0.2385
                    mn(x,:)=mn(x,)*-50;
                else
                    mn(x,:)=mn(x,)*50;
                end
            end
            break
        end
    end
    Mx = max(mx,[],2);
    Mn = min(mn,[],2);

    Cost=[Mn,Mx];
    [~, Sorted]=sortrows(Cost,[-1 2]);
    pop=pop(Sorted);
    Best.Costs=min(pop(1).Min);
    Worst.Costs=min(pop(end).Min);

    % Initialize Offsprings Population
    newpop = [];

    % Reproduction
    for i = 1:numel(pop)
        ratio = (min(pop(i).Min) - Worst.Costs)./(Best.Costs - Worst.Costs);
        S = floor(Smin + (Smax - Smin)*ratio);
        for j = 1:S
            % Initialize Offspring
            newsol = empty_plant;
            % Generate Random Location
            newsol.Position = reproduction (pop(i).Position, sigma1);
            newsol.Time = pop(i).Time + sigma2 * randn(VarSize);

            % Apply Lower/Upper Bounds

```

```

newsol.Position = max(newsol.Position, VarMin);
newsol.Position = min(newsol.Position, VarMax);
% Apply Lower/Upper Bounds
newsol.Time = max(newsol.Time, TVarMin);
newsol.Time = min(newsol.Time, TVarMax);

% Evaluate Offspring
[newsol.Max, newsol.Min] = CostFunction(newsol.Position, newsol.Time);

% Add Offspring to the Population
newpop = [newpop
          newsol]; %#ok
end
end
% Merge Populations
pop = [pop
       newpop];
% Sort Population
maxim = (reshape([pop.Max]', nu_gr, []))';
minim = (reshape([pop.Min]', nu_gr, []))';
% penalti
for x=1:length(maxim)
    for j=1:nu_gr
        if maxim(x,j)>=120
            maxim(x,:)=maxim(x,:)*5;
            if min(minim(x,:))>0.2385
                minim(x,:)=minim(x,:)*-50;
            else
                minim(x,:)=minim(x,:)*50;
            end
            break
        end
    end
end
end

Max = max(maxim,[],2);
Min = min(minim,[],2);

Cost=[Min,Max];
[~, Sorted]=sortrows(Cost,[-1 2]);
pop=pop(Sorted);
% Competitive Exclusion (Delete Extra Members)
if numel(pop)>nPop
    pop = pop(1:nPop);
end

% Store Best Solution Ever Found
BestSol = pop(1);
% Store Best Cost History

```

```

BestMax(it,:)= BestSol.Max;
BestMin(it,:)= BestSol.Min;
BestTime(it,:)= BestSol.Time;
BestPosition(1+nu_gr*(it-1):nu_gr*it,:)= BestSol.Position;

% Display Iteration Information
disp(['Iteration ' num2str(it) ': Best Max = ' num2str(BestMax(it,:)) ': Best Min = '
num2str(BestMin(it,:)) ': Best Time ' num2str(BestTime(it,:)) ']);
end

```

تابع انتخاب تصادفی ترتیب خاموشی

```

function [a]=position(nu_gr, nu_p)
for l=1:nu_gr
    b = randi([0 1],1,nu_p);
    a(l,:)=b;
end

```

تابع تولیدمثل استاندارد

```

function y=reproduction(x,sigma)
nVar=numel(x);
n_pro=ceil(sigma*nVar);
j=randsample(nVar,n_pro);
y=x;
y(j)=1-x(j);
end

```


منابع

منابع فارسی

- [1] نجمائی م., (۱۳۷۴), "ضربه قوچ", انتشارات دانشگاه علم و صنعت
- [3] پارسا صدر ا., (۱۳۹۴), "مدل سازی عددی جریان غیرماندگار در سیستم های گروهی پمپاژ آب", پایان نامه کارشناسی ارشد, دانشکده عمران, دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [17] افشار م., محبوبی ج., (۱۳۸۶), "طراحی بهینه سیستم انتقال پمپدار در مقابل ضربه قوچ ناشی از توقف ناگهانی پمپ با استفاده از دو روش الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی ریاضی", کنفرانس آب و فاضلاب. شماره ۱۸, صفحه ۳۵-۴۸.

- [2] A. Parsasadr, A. Ahmadi, and A. Keramat, (2016), "Waterhammer Caused by Intermittent Pump Failure in Pipe Systems Including Parallel Pump Groups," *Int. J. Eng. A Basics*, vol. 29, no. 4, pp. 444–453.
- [4] A. Keramat, A. Ahmadi, and A. Majd, (2009), "Transient cavitating pipe flow due to a pump failure," in *International meeting of the workgroup on cavitation and dynamic problems in hydraulic machinery and systems*.
- [5] E. Elbeltagi, T. Hegazy, and D. Grierson, (2005), "Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 19, pp. 43–53.
- [6] A. R. Mehrabian and C. Lucas, (2006), "A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization," *Ecol. Inform.*, vol. 1, no. 4, pp. 355–366.
- [7] H. Chaudhry and M. Hussaini, (1985) "Second-Order Accurate Explicit Finite-Difference Schemes for Waterhammer Analysis," *J. Fluids Eng.*, vol. 107, pp. 523–529.
- [8] D. J. Wood, (2005) "Waterhammer Analysis — Essential and Easy (and Efficient) Waterhammer Analysis — Essential and Easy ,, and Efficient ...," *J. Environ. Eng.*, pp. 1123–1131.
- [9] M. H. Chaudhry, (2014), *Applied hydraulic transients*. Springer.
- [10] E. B. Wylie, V. L. Streeter, and L. Suo, (1993), *Fluid transients in systems*, vol. 1. Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.
- [11] Thorley, (1969), "Pressure Transients in Hydraulic Pipelines," *ASME J. Basic Eng.*, vol. 91, pp. 453–461.
- [12] A. Bergant and A. R. Simpson, (1999) "Pipeline column separation flow regimes," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 125, no. 8, pp. 835–848.
- [13] A. Bergant, A. R. Simpson, and A. S. Tijsseling, (2006), "Water hammer with column separation: A historical review," *J. Fluids Struct.*, vol. 22, no. 2, pp. 135–171.
- [14] A. Ahmadi and A. Keramat, (2010) "Investigation of fluid–structure interaction with various types of junction coupling," *J. Fluids Struct.*, vol. 26, no. 7–8, pp. 1123–1141.
- [15] V. Guinot, (2002), "The Time-Line Interpolation Method for Large-Time-Step

- Godunov-Type Schemes,” *J. Comput. Phys.*, vol. 417, pp. 394–417.
- [16] M. Sepehran and M. Noudeh, (2012) “Water hammer simulation by implicit finite difference scheme using non-symmetrical staggered grid,” *Interact.*, vol. 8, p. 9.
 - [18] A. Couzinet, L. Gros, and D. Pierrat, (2013), “Characteristics of Centrifugal Pumps Working in Direct or Reverse Mode : Focus on the Unsteady Radial Thrust,” *Int. J. Rotating Machinery*, vol. 2013,.
 - [19] A. K. Soares, D. Covas, and L. Reis, (2008), “Analysis of PVC Pipe-Wall Viscoelasticity during Water Hammer,” *J. Hydraul. Eng.*, pp. 1389–1394.
 - [20] A. K. Soares, D. Covas, and H. Ramos, (2013) “Damping Analysis of Hydraulic Transients in Pump-Rising Main Systems,” *J. Hydraul. Eng.*, no. February, pp. 233–243.
 - [21] C. Veenhuis, (2010), “Binary Invasive Weed Optimization,” in *Second World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing*, pp. 449–454.
 - [22] S. Lingireddy, J. E. Funk, H. Wang, and E. Lreddyengrukyedu, (2000), “Genetic Algorithms in Optimizing Transient Suppression Devices,” in *Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management*.
 - [23] B. S. Jung, B. W. Karney, and M. Asce, (2006) “Hydraulic Optimization of Transient Protection Devices Using GA and PSO Approaches,” *J. WATER Resour. Plan. Manag.*, vol. 132, no. February, pp. 44–52.
 - [24] W. Tian, G. H. Su, G. Wang, S. Qiu, and Z. Xiao, (2008), “Numerical simulation and optimization on valve-induced water hammer characteristics for parallel pump feedwater system,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 2280–2287.
 - [25] M. Das Saikia and A. K. Sarma, (2006), “Simulation of water hammer flows with unsteady friction factor,” *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 1, no. 4, pp. 35–40.
 - [26] A. Bergant and A. R. Simpson, (1997), “*Development of a generalised set of pipeline water hammer and column separation equations*”. University of Adelaide, Department of Civil and Environmental Engineering,.
 - [27] A. Adamkowski and M. Lewandowski, (2006) “Experimental Examination of Unsteady Friction Models for,” *J. Fluids Eng.*, vol. 128, no. November 2006, pp. 1351–1363.

Abstract

In large water supply systems, several pump stations are usually used to provide pipelines head pressure. Each station may consist of some parallel pumps to provide water pipeline discharge. By sudden failure of these pumps, an unsteady flow will occur which cause pressure fluctuation. Assessment and control the maximum and the minimum pressure of pipeline is essential to design pipeline and utilize it. One method to diminish the harmful effects of water hammer is step by step shut down. The main purpose of this thesis is determining the interval between the steps and the pattern of this shutdown somehow that the maximum pressure reduce and the minimum pressure rise up and stay in a safe range. First, a numerical model of a comprehensive pumping system consists of some stations and diversity of parallel pump in the stations is simulated. This model simulates unsteady flows of sudden failure. The equations of this modeling are flow equations (continuity and momentum) and pump equations (head and torque). This model is recalled as a function to invasive weeds algorithm (IWO). The intervals between two steps of failure are reproduced by standard IWO and failure pattern is reproduced by binary_IWO. The maximum and minimum pressures are optimized by IWO. Finally, the optimized variables are expanded into the different length of pipelines and number of stations. The results illustrated that the shutdown pattern could have a significant effect on the pipeline's pressure. The harmful effect of water hammer can be restricted only by choosing the appropriate pattern and interval of two steps of the shutdown. Since these two variables can have a wide range of diverse values, using an optimizing algorithm will be effective. The results of optimizing are intensively depended on power and number of pumps, length of pipes ..., so optimized variables are valid in a specific pumping system. However, a limit range of these variables can be presented for a specific pumping system and the expansion of this optimization also is given for the different length of pipeline and number of station. The result demonstrates optimized variables are also effective for these changes, but by increasing the length of pipe, the maximum pressure rise and the minimum pressure falls down and conversely, by reducing the pipeline's length, the maximum and minimum pressure respectively, decrease and increase.

Keywords: water hammer, parallel pumping system, invasive weed colony, step by step failure, explicit Method of Characteristic, steady and unsteady flow.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

**Optimizing systems of series and parallel group pumping in
pipelines**

Mozhgan Ebrahimpour

Supervisor:

Dr. Ahmad Ahmadi

Advisor:

Amir Parsasadr

January 2019