بهینه سازی وسائل حفاظت خطوط انتقال آب دربرابر جریان غیرماندگار با استفاده از الگوریتم CFO

سید محمود جزایری مقدس[1]

۱-گروه عمران، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران، mahmoodjazayeri@yahoo.com

تاریخ دریافت:۱۳۹۹/۰۶/۰۶ تاریخ پذیرش:۱۳۹۹/۰۷/۱۷

چکیده

یکی از مهمترین مباحث در طراحی خطوط لوله انتقال آب تحت فشار، حفاظت در برابر فشارهای ترانزینت ناشی از ضربه قوچ در خاموش شدن ناگهانی پمپ است. بهترین راه حل برای این منظور، استفاده از ایرچمبر برای کاهش فشارهای ترانزینت است که به تناسب حجم آن، هزینه قابل توجهی دارد. برای کاهش این حجم و کم کردن هزینه حفاظت، استفاده از شیرهای ورود هوا در نقاطی از خط لوله پیشنهاد می‌گردد. تعیین حجم مخزن ایرچمبر و نوع و نقاط مناسب برای قراردهی شیرهای هوا با هدف کاهش هزینه، یک مساله بهینه‌سازی است که در آن ضمن تلاش برای کاهش هزینه سیستم حفاظت، لازم است قرار گرفتن فشارهای ترانزینت سیستم در محدوده مجاز نیز کنترل گردد. لذا نتایج تحلیل ترانزینت سیستم بخشی از تابع هدف این بهینه‌سازی است. در این مقاله مدلی برای این بهینه‌سازی بر اساس روشCFO توسعه داده شده است. روش CFO یک روش قطعی است که برخلاف بسیاری از روشهای تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک (GA)، در اجراهای مختلف جوابهای یکسانی می دهد. لذا با درجه اطمینان بالایی می‌تواند جواب بهینه‌سازی را ارائه نماید. در این مقاله یک مطالعه موردی مربوط به یک خط لوله، یک بار با استفاده از مدل پیشنهادی به روش CFO و بار دیگر با روش GA بهینه‌سازی شد. نتایج هر دو روش یکسان بدست آمد و باعث صرفجویی به میزان حدود ۳۰ درصد در هزینه حفاظت سیستم شد. با مقایسه دو روش همچنین نشان داده شد که CFO با تعداد تکرار کمتر و سرعت بالاتر نسبت به GA کارایی بیشتری در مدل ارائه شده دارد.

واژه های کلیدی: ***بهینه سازی، روش CFO ، جریان غیرماندگار، خطوط لوله انتقال آب، مخزن هوای فشرده، شیر هوا***

مقدمه

یکی از مسائل مهم در طراحی خطوط لوله پمپاژ آب، حفاظت آنها در برابر اثرات ناشی از ضربه قوچ است. مهمترین عامل ایجاد ضربه قوچ در این خطوط لوله، خاموش شدن ناگهانی پمپ‌ها است که می‌تواند فشارهای داخلی نوسانی مثبت و منفی شدیدی در طول لوله ایجاد کند. این فشارها اگر از حد ظرفیت مجاز لوله بالاتر بروند باعث ترکیدگی لوله می‌شوند و اگر از حد فشار بخار آب کمتر شوند باعث ایجاد کاویتاسیون در لوله می‌گردند. نصب وسائل حفاظتی در طول خط لوله برای جلوگیری از ایجاد این فشارهای نامطلوب لازم است. یکی از بهترین وسائل برای حفاظت در برابر این نوع ضربه قوچ، ایرچمبر است.(Stephenson 2002) این وسیله دارای یک مخزن هوای فشرده بوده که کارکرد دوگانه ای دارد. این مخزن با استفاده از مجرایی که یک دریچه باز و بست اتوماتیک دارد به خط لوله متصل می‌شود. وقتی در اثر ضربه قوچ فشارهای مثبت بزرگ ایجاد می‌شود، با بازشدن این دریچه سیال وارد

مخزن شده و فشار در لوله کاهش داده می‌شود. و زمانیکه فشار منفی ایجاد می‌گردد نیز دریچه باز شده و اینبار سیال درون مخزن وارد خط لوله شده تا فشارهای منفی را خنثی نماید. اثبات شده که بهترین محل برای نصب ایرچمبر و اتصال آن به خط لوله، بلافاصله بعد از پمپ است(Wang et al. 2013).

در خطوط لوله انتقال بزرگ با ظرفیت انتقال آب بالا، بدلیل شدت زیاد ضربه قوچ نیاز به ایرچمبر با حجم مخزن بسیار بالا است که باتوجه به اینکه قیمت ایرچمبر با افزایش حجم آن شدیداً افزایش می‌یابد، این امر می‌تواند هزینه گزافی را به پروژه تحمیل نماید. برای کاهش این حجم و کم کردن هزینه حفاظت سیستم، استفاده از وسائل دیگر همزمان با ایرچمبر می‌تواند مفید باشد و باتوجه به اینکه در خاموش شدن پمپ بیشترین مشکل از جانب فشارهای منفی در خط لوله ایجاد می‌شود، استفاده از شیرهای ورود هوا گزینه مناسبی برای این منظور است. شیرهای ورود هوا می‌توانند در طول خط لوله نصب گردند و در مواقعی که فشار داخل خط لوله از فشار هوای خارج کمتر شد، با وارد کردن هوا به لوله فشار داخل را با خارج متعادل نموده و فشار منفی را خنثی نمایند. بدلیل اینکه شیرهای هوا وسائل نسبتاً ارزانتری هستند، بکارگیری تعداد محدودی از آنها در طول خط لوله می‌تواند باعث کاهش حجم مخزن و به حداقل رسیدن هزینه کل حفاظت سیستم در برابر جریان ترانزینت شود. تعیین تعداد و محل‌های مناسب برای این شیرها و بدست آوردن حجم مخزن ایرچمبر متناظر با آن که بتواند ضمن تضمین شرایط مجاز هیدرولیکی سیستم، حداقل هزینه کل را داشته باشد، یک مساله بهینه‌سازی پیچیده است.

بهینه‌سازی خطوط لوله انتقال آب با درنظر گرفتن جریان ترانزینت در سالهای اخیر مورد مطالعه تعدادی از پژوهشگران قرار گرفته‌است. لین و کارنی (1997) بهینه‌سازی را برای یک خط لوله ساده متصل به یک پمپ و یک مخرن ذخیره‌ای بکار گرفتند. آنها از یک روش شمارش کامل و یک روش انتخاب احتمالاتی برای دو تحلیل ماندگار و غیرماندگار استفاده کردند و یک روش حفاظتی بهینه از نظر شرایط هیدرولیکی بدست آوردند.

لینگیردی و همکاران (2000) یک مدل بهینه‌سازی جهت تعیین اندازه سرج‌تانک بر اساس الگوریتم ژنتیک را توسعه دادند که با تأمین قیود، اندازه‌های بهینه‌ی تانک را ارائه می‌دهد.

جونگ و کارنی(2004) اثر جریان غیرماندگار را در انتخاب قطرهای بهینه در یک شبکه با درنظر گرفتن معیارها در جریان ماندگار مدنظر قرار دادند و برای بهینه‌سازی از روش GA[1] و PSO[2] استفاده نمودند.

جونگ و کارنی (2006) برای بهینه کردن اندازه و محل وسائل هیدرولیکی کنترل اثرات ضربه قوچ در شبکه های توزیع آب دارای مخازن متعدد، از ترکیب GA و PSO استفاده کردند. آنها در آن تحقیق نشان داده شد که در بسیاری از مسائل، استفاده از روش‌های بهینه‌ی ساده‌تر نسبت به روش‌های پیچیده‌تر حفاظت از ضربه قوچ، بهتر عمل می‌کنند.

جونگ و همکاران(2009) در پژوهش دیگری، طراحی بهینه‌ی یک سیستم توزیع آب را تحت شرایط غیرماندگار بوسیله یک الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه فرمول‌بندی کردند. در این تحقیق، دو هدف حداقل سازی هزینه‌ی لوله و حداکثرسازی قابلیت اطمینان هیدرولیکی مدنظر قرار گرفته است.

همچنین جونگ و همکاران (2011) یک روش بهینه‌سازی دو هدفه را برای بهینه‌کردن قطر لوله‌ها در یک شبکه توزیع آب دارای مخزن بکار گرفتند. آنها تابعی تحت عنوان فاکتور پتانسیل آسیب امواج را بعنوان یک هدف و هزینه شبکه لوله را بعنوان هدف دیگر

[1] -Genetic Algorithm
[2] -Particle Swarm Optimization

انتخاب نمودند و با بکارگیری روش NSGA[1] راه حل های بهینه پارتو را در فضای جستجوی هزینه‌ی شبکه و فاکتور پتانسیل آسیب امواج بدست آورند. در راه حل-های ارائه شده‌ی آنها از هیچ وسیله حفاظتی استفاده نشده و تنها متغیر تصمیم‌گیری قطر لوله‌ها می‌باشد.

در مقاله ای دیگر، جونگ و کارنی(2013) طراحی بهینه‌ی یک سیستم توزیع آب را برای بدترین حالت-های جریان غیرماندگار بصورت دوگامه بهینه‌سازی نمودند. در اولین گام، روش بهینه‌سازی PSO برای شناسایی مجموعه گره‌های بحرانی که بیشترین اثر را در جریان غیرماندگار دارند بکار گرفته شده و در گام دوم، بهینه‌سازی دوهدفه برای تعیین سایزهای لوله بهینه با درنظر گرفتن دو هدف حداقل کردن هزینه و حداقل نمودن خسارت جریان غیرماندگار بکار گرفته شده است.

در تحقیق دیگری فتحی‌مقدم و همکاران (2013) روش GA را برای بهینه‌سازی طراحی تونل آب‌بر نیروگاه برقآبی و مخزن موج‌گیر آن در برابر ضربه قوچ ناشی از بسته‌شدن شیر خروجی بکار گرفتند. آنها در این مقاله روشی مبتنی بر آلگوریتم ژنتیک برای بدست آوردن قطر تونل، پنستاک و مخزن موج‌گیر ارائه کردند که تابع هدف در آن نسبت فایده به هزینه درنظر گرفته شد.

در هیچ کدام از تحقیقاتی که در بالا بررسی شد، بهینه‌سازی ترکیب وسائل کنترلی برای کاهش هزینه حفاظت ترانزینت خط لوله در عین رعایت محدودیت-های هیدرولیکی مورد پژوهش قرار نگرفته است. همچنین روش اصلی بهینه‌سازی تمام آن تحقیقات الگوریتم ژنتیک است که در عین دقت بالا و قوی بودن در مسائل پیچیده، ذاتاً روشی با حجم محاسباتی بالا و سرعت همگرایی پایین است که این محدودیت در سیستم‌های انتقال با طول بالا می‌تواند رسیدن به جواب بهینه را مشکل کند.

در این مقاله از روش (CFO) برای یک مدل پیشنهادی بهینه‌سازی حجم مخزن ایرچمبر و نوع، تعداد و محل‌های مناسب شیرهای هوا برای به حداقل رساندن هزینه حفاظت سیستم استفاده شده است. در این مدل کمترین هزینه با حفظ شرایط هیدرولیکی سیستم در جریان ترانزینت پیگیری می‌شود. به این معنی که بهینه‌سازی دارای محدودیت است و این محدودیت باید در مدل اعمال گردد. روش CFO یک روش جدید جمعیت گرای متاهیوریستیک است که نخستین بار توسط ریچارد فورماتو (2007) ارائه گردید. برخلاف بسیاری از دیگر روشهای متاهیوریستیک، روش CFO استوکاستیک نبوده و حالت دترمنیستیک دارد. لذا پاسخ‌های بدست آمده از آن از درجه اعتماد بالاتری برخوردارند. این روش قابلیت جستجوی چند بعدی در فضای تصمیم گیری را دارد. فلسفه این روش بر گرفته از قوانین دوم وسوم نیوتن و اثر جذب اجرام به طرف یکدیگر می باشد. مدل بهینه‌سازی ارئه شده شامل یک تابع هدف هزینه است که محدودیت‌های هیدرولیکی که حفظ فشارهای سیستم در محدوده مجاز هستند، بعنوان تابع پنالتی در آن گنجانده شده است. لذا تابع هدف یک تابع ضمنی بوده و شکل صریحی ندارد. زیرا فشارهای سیستم در حالت ترانزینت باید از تحلیل ضربه قوچ بدست آیند که فرآیندی عددی است. در این تحقیق از روش عددی MOC[2] برای تحلیل ترانزینت جریان در لوله استفاده شده است. لذا روش بهینه‌سازی CFO با الگوریتم عددی MOC لینک شده و مدل بهینه‌سازی را تشکیل داده‌اند.

در ادامه ابتدا معادلات حاکم بر جریان ترانزینت و روش عددی MOC برای حل آنها به اختصار شرح داده شده و سپس روش بهینه‌سازی و نحوه لینک کردن آن با تحلیل ترانزینت ارائه می‌گردد. در انتها نیز بهینه‌سازی طرح حفاظت از یک خط لوله واقعی بعنوان مطالعه

[1] - Non-dominates Sorting Genetic Algorithm
[2] -Method Of Charachteristics

موردی با مدل پیشنهادی و یک روش دیگر انجام شده و نتایج آن مورد بحث قرار می‌گیرند.

تحلیل عمومی ضربه قوچ

تحلیل ضربه قوچ بر اساس دو معادلهٔ پیوستگی و اندازهٔ حرکت انجام می‌گیرد. این معادلات به ترتیب به شکل دیفرانسیلی زیر نوشته می‌شوند (Wylie and Streeter 1993):

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\frac{Q}{A}\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{a^2}{gA}\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{Q}{A}sin\,\theta=0 \qquad (۱)$$

$$gA\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{\partial Q}{\partial t}+Q\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{fQ|Q|}{2DA^2}=0 \qquad (۲)$$

که در آن x : فاصله ؛ t : زمان؛ $H=H(x,t)$: ارتفاع پیزومتریک سیال؛ $Q=Q(x,t)$: دبی جریان؛ D : قطر داخلی لوله؛ A: سطح مقطع جریان a : سرعت موج فشاری سیال؛ f : ضریب اصطکاک دارسی وایسباخ؛ g : شتاب ثقل است.

روش‌های مختلفی برای حل این دستگاه معادلات وجود دارد که در این تحقیق یکی از بهترین آنها، بنام روش خطوط مشخصه[1] (MOC) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش معادلات (۱) و(۲) بر روی مسیرهایی که به آنها خطوط مشخصه[2] a^- و a^+ گفته می‌شود، به معادلات دیفرانسیل کامل، تبدیل شده و سپس به‌روش تفاضل محدود[3] حل می‌شوند (Wylie and Streeter 1993) . مسیرهای a^- و a^+ دو خط با معادلات $dx/dt=\pm a$ هستند. حل با روش مذکور نیازمند شرایط اولیه (که همان شرایط جریان در حالت ماندگار اولیه است) و شرایط مرزی است.

شرایط مرزی

در هر نقطه میانی خط لوله می‌توان با حل معادلات a^- و a^+ ، مجهولات H و Q در پایان هرگام زمانی را با فرض یکسان بودن هد و دبی در نقطه تقاطع دو خط بدست آورد. ولی برای نقاط مرزی شرایط متفاوتی حاکم است. استریتر و وایلی (1993) و چادری (2013) شرایط جریان در این نقاط مرزی را تشریح نموده‌اند. شرایط حاکم بر مخازن ابتدایی و انتهایی، نقاط اتصال لوله‌ها، شیرهای انتهایی و میانی و باز و بسته شدن آنها، ادوات کنترل ضربه قوچ و خاموش شدن ناگهانی پمپ از جمله شرایط مرزی تشریح شده در آن مراجع هستند. در ادامه، شرایط مرزی عامل ایجاد کننده ضربه قوچ در این مطالعه و شرایط مرزی کنترل کننده‌های ضربه قوچ مورد بررسی در این پژوهش شرح داده می‌شوند.

مدل بهینه سازی

در طرح ترکیبی حفاظت از سیستم در برابر فشارهای ترانزینت، محل ایرچمبر باید ثابت و بلافاصله بعد از پمپ درنظر گرفته شود. ولی محل شیرهای هوا و تعدادشان باید باتوجه به پروفیل فشار ترانزینت با استفاده از ابزار بهینه‌سازی که ارائه می‌گردد تعیین شوند. بنابراین باتوجه به هدف مساله که رسیدن به حداقل هزینه است، متغییرهای تصمیم‌گیری باید تعداد و محل شیرهای هوا و حجم مخزن ایرچمبر باشند. برای این منظور، در این مدل نقاطی بعنوان کاندیدا برای قرارگیری شیرهای هوا درنظر گرفته می‌شوند و به تعداد این نقاط، متغیر تعریف می‌شود که با توجه به اینکه تعدادی گزینه برای شیر هوا می‌توان درنظر گرفت، مقدار این متغیرها عددی صحیح بین صفر تا تعداد گزینه شیرهوا می‌تواند باشد. هر عدد برای هر متغیر نشان دهنده شماره یکی از گزینه‌های فرض شده برای شیر است و عدد صفر برای هرکدام از این متغیرها به معنی عدم وجود شیر در آن نقطه‌ی کاندیدا شده است. متغیر تصمیم‌گیری دیگر نیز حجم ایرچمبر است که با توجه به اینکه معمولاً یک لیست تجاری برای انتخاب حجم ایرچمبر وجود دارد، مقدار آن می‌تواند از بین چند گزینه‌ی از پیش تعریف شده انتخاب گردد.

---
[1] - Method Of Characteristics
[2] - Characteristic Lines
[3] - Finite Differences Method

بنابراین مقدار این متغیر، عددی بین ۱ تا تعداد گزینه‌ی ایرچمبر است.

روش CFO

در این مطالعه استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی CFO برای مدل ارائه شده پیشنهاد گردیده است. این روش بر اساس حرکت کاوشگرها به سمت یکدیگر در فضای تصمیم‌گیری طبق قوانین نیوتن بنا شده است .در این روش سایر کاوشگر به سمت کاوشگری جذب می گردند که جرمش (مقدار تابع هدف) بیشترین مقدار را دارد. این الگوریتم به نحوه توزیع اولیه کاوشگرها حساسیت دارد، به طوریکه پیشنهادات بسیاری در خصوص نحوه توزیع آنها مطرح شده است، مانند توزیع کاوشگرها در راستای محور مختصات به صورت توزیع یکنواخت در هریک از جهات موجود، توزیع بر روی فضای قطری مسئله، توزیع بصورت متعامد یکنواخت در هر یک از جهات، یا توزیع بصورت تصادفی، این حساسیت به توزیع اولیه، بر قدرت روش در تقابل با توپولوژی مسئله می افزاید. در این روش ابتدا پس از تعیین پارامتر های ورودی الگوریتم و حدود مرزهای مساله،کاوشگرها باید به یکی از روش‌های گفته شده در فضای تصمیم گیری توزیع اولیه شوند. به این صورت که برای هرکاوشگر یک بردار N_d بُعدی بعنوان بردار موقعیت بنام R و یک بردار N_d بعدی بعنوان بردار شتاب بنام A اختصاص داده می‌شود. N_d تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری است. در بدو امر مولفه‌های بردارهای A برای همه کاووشگرها برابر صفر فرض می گردد و با داشتن R برای هر کاوشگر که از توزیع اولیه تعیین گردید، به محاسبه مقدار تابع هدف برای هر کاوشگر مبادرت می‌گردد که این مقادیر در متغیری بنام M ذخیره می‌گردند. سپس الگوریتم وارد حلقه گام‌های زمانی شده و به محاسبه محل جدید استقرار کاوشگرها (new positions) می‌پردازد. تعیین محل جدید کاوشگرها با استفاده از معادله حرکت امکانپذیر است. این معادله برای هر متغیر تصمیم‌گیری در هر کاوشگر مطابق رابطه زیر است:

$$R(p,i,j) = R(p,i,j-1) + \frac{1}{2}A(p,i,j-1)\Delta t^2 \quad (۳)$$

که در آن $R(p,i,j)$ بردار موقعیت متغیر تصمیم گیری i ام برای کاوشگر p ام در زمان j ، $R(p,i,j-1)$ بردار موقعیت متغیر تصمیم گیری i ام برای کاوشگر p ام در زمان $j-1$ ، $A(p,i,j-1)$ بردار شتاب متغیر تصمیم گیری i ام برای کاوشگر p ام در زمان $j-1$ و Δt طول بازه زمانی است که همواره برابر واحد درنظر گرفته می شود($\Delta t = 1$).

بردار شتاب نیز برای هر لحظه زمانی j از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$A(p,i,j) = G\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq p}}^{N_P} U\big(M(k,j) - M(p,j)\big)\big(M(k,j) - M(p,j)\big)^{\alpha} \times \frac{R(k,i,j) - R(p,i,j)}{\left|\vec{R}_j^k - \vec{R}_j^p\right|^{\beta}} \quad (۴)$$

که در آن $M(p,j)$ مقدار تابع هدف برای کاوشگر p ام در لحظه j ام است و :

$$\left|\vec{R}_j^k - \vec{R}_j^p\right| = \sqrt{\sum_{m=1}^{N_d}(R(k,m,j) - R(p,m,j))^2} \quad (۵)$$

$$U = \begin{cases} 0 & if\ \ M(k,j) - M(p,j) \geq 0 \\ 1 & otherwise \end{cases} \quad (۶)$$

$$\vec{R}_j^p = \sum_{k=1}^{N_d} x_k^{P,j}\,\hat{e}_k \quad (۷)$$

که در آن $x_k^{p,j}$ مختصات کاوشگر p در راستای متغیر تصمیم گیری k ام و در لحظه j ام و $\hat{e}_k$ نیز بردار واحد در راستای متغیر تصمیم گیری k ام است. مقادیر ثابت α و β و G نیز با کالیبراسیون در مساله باید تعیین شود.

در صورتی که مقادیر بدست آمده برای $R(p,i,j)$ در رابطه (۳) خارج از محدوده حداقل و حداکثر باشد، با

استفاده از روابط (۸) و (۹) به محدوده مجاز بازگردانده می‌شود:

$$if \quad R(p,i,j) < x_i^{min} \ then$$
$$R(p,i,j) = x_i^{min} + F_{rep}\big(R(p,i,j-1) - x_i^{min}\big) \quad (۸)$$

$$if \quad R(p,i,j) > x_i^{max} \ then$$
$$R(p,i,j) = x_i^{max} - F_{rep}\big(x_i^{max} - R(p,i,j-1)\big) \quad (۹)$$

که در آن x_i^{min} و x_i^{max} مقادیر حداقل و حداکثر متغیر تصمیم‌گیری i ام و $0.5 < F_{rep} < 0.9$ است که مقدار آن باید برای هر مساله با آزمون خطا تعیین شود.

با محاسبات گفته شده فوق، گام‌های زمانی تا رسیدن به پاسخ بهینه طی می‌گردند. شایان ذکر است که روش CFO یک روش ماکزیمم سازی است. جزئیات بیشتر در خصوص این روش در Formato (2007) آمده است.

تابع هدف

تابع هدف در این مدل بهینه‌سازی، هزینه حفاظت از سیستم انتقال است که باید حداقل سازی شود. با توجه به اینکه این حداقل‌سازی باید با حفظ فشارها در محدوده مجاز در کل خط لوله همراه باشد، و نیز با توجه به غیرمقید بودن روش بهینه‌سازی، محدودیت فشارهای سیستم بعنوان تابع پنالتی در تابع هدف گنجانده می‌شوند. به این معنی که در صورت عدول از محدودیت فشارها، تابع هدف مقدار قابل توجهی از پنالتی را تجربه نماید. بر این اساس تابع هدف بشرح زیر تعریف می‌گردد:

$$M = -1(C_a + \sum_{i=1}^{n} C_{vi} + Penalty) \quad (۱۰)$$

که در آن M تابع هدف، C_a هزینه ی مخزن هوا، C_{vi} هزینه شیر ورود هوا، n تعداد شیرهای ورود هوا در سیستم و PF تابع پنالتی است. تابع پنالتی برای فشارهای ماکزیمم و مینیمم بصورت زیر تعریف می شود:

$$Penalty = max\left(0, PF\sum_{j=1}^{N_J}\left(P_{min.all}^{j} - P_{min}^{j}\right)\right) + max\left(0, PF\sum_{j=1}^{N_J}\left(P_{max}^{j} - P_{max.all}^{j}\right)\right) \quad (۱۱)$$

که در آن PF تابع پنالتی، N_j تعداد نقاط محاسباتی در خط لوله، P_{max}^{j} و P_{min}^{j} بترتیب فشارهای مینیمم و ماکزیمم در گره j و $P_{min.all}^{j}$ حداقل فشار مجاز و $P_{max.all}^{j}$ حداکثر فشار مجاز در گره j است.

مقدار $Penalty$ زمانیکه فشار در حد مجاز باشد صفر و وقتی خارج از حد مجاز باشد مقداری بزرگتر از صفر دارد. با توجه به مدل بهینه‌سازی که حداقل‌سازی است، مدل سعی در صفر کردن $Penalty$ خواهد نمود و به این ترتیب مقادیری را بعنوان متغیرهای تصمیم‌گیری انتخاب خواهد کرد، که در تحلیل ترانزینت با آنها، فشارها در حد مجاز قرار گیرند. ضریب PF نیز با توجه به شرایط مساله برای ایجاد وزن مناسب جهت تاثیرگذاری قابل توجه تابع پنالتی در تابع هدف تنظیم می‌شود.

ضریب -1 پشت عبارت تابع هدف در رابطه (۸) به این دلیل استفاده شده است که ماهیت روش CFO حداکثر سازی است و باتوجه به اینکه مدل پیشنهادی در این مقاله حداقل سازی هزینه است، لازم است که تابع هدف منفی شود تا روش CFO برای مدل قابل استفاده باشد.

الگوریتم مدل

روش کار در مدل بهینه سازی ارائه شده به این صورت است که قبل از شروع بهینه‌سازی، خط لوله برای شرایط نرمال طراحی می‌گردد. سپس با مشخصات معلوم برای لوله‌ها از قبیل جنس، قطر، ضخامت جداره و طول قطعات و مشخصات معلوم برای ایستگاه پمپاژ، نقاط کاندیدا برای قرارگیری ایرچمبر و ایرولو در طول خط لوله انتخاب شده و لیست گزینه‌های مدنظر برای هر وسیله مشخص و به مدل معرفی می‌گردند. سپس مدل با استفاده از الگوریتم CFO و تابع

هدف شرح داده شده، کم هزینه ترین ترکیب حجم ایرچمبر و ایرولوها، برای محافظت سیستم در شرایط جریان میرا ناشی از توقف پمپ و رسیدن به شرایط مجاز در فشارهای مثبت و منفی در تمام طول لوله را بدست می‌آورد. همانگونه که گفته شد، در روش CFO بدلیل اینکه روش قطعی می‌باشد، توزیع اولیه کاوشگرها بسیار با اهمیت است و جواب نهایی به شیوه این توزیع حساسیت دارد. در این پژوهش از سه روش توزیع اولیه یکنواخت، توزیع قطری و توزیع یکنواخت متعامد روی محورها Formato 2011 استفاده شده است تا بهترین روش از بین آنها برای مساله انتخاب شود.

باتوجه به اینکه این بهینه‌سازی انتخاب گزینه برتر برای ایرچمبر و ایرولو از بین گزینه های موجود است، متغیرهای تصمیم‌گیری حالت پیوسته نداشته و گسسته‌اند. از طرفی روش CFO برای متغیرهای پیوسته قابل تعریف است. لذا در اجرای الگوریتم کلی، لازم است متغیرها بصورت پیوسته و حقیقی فرض شده و هنگامی که متغیری برای انتخاب وسیله به لیست تجاری معرفی می‌گردد، روند شود و به عدد صحیح تبدیل گردد تا امکان اختصاص مشخصات لازم از لیست تجاری برای آن وسیله فراهم گردد.

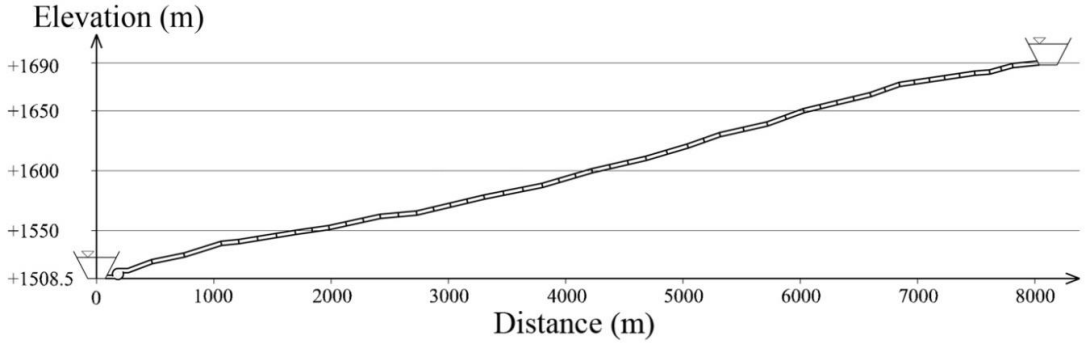
بنابرین برای بهینه‌سازی سیستم، یک روش گام به گام بشرح ذیل اجرا می‌گردد:

- گام اول: تعیین حدود مساله و مشخصات جریان سیال در حالت نرمال در خط لوله
- گام دوم: تولید اولیه کاوشگرها و تعیین بردارهای اعداد حقیقی R برای آنها
- گام سوم: تبدیل بردار اعداد حقیقی R به بردار اعداد صحیح با روند کردن R و انتخاب مشخصات وسائل حفاظتی برای هر کاوشگر از لیست‌های تجاری ایرچمبر و ایرولو
- گام چهارم: تحلیل ترانزینت خط لوله و بدست آوردن فشارهای ماکزیمم و مینیمم در تمام نقاط محاسباتی لوله برای هرکدام از کاوشگرها
- گام پنجم: محاسبه تابع هدف برای هر یک از کاوشگرها از رابطه (۸)
- گام ششم: محاسبه شتاب‌ها برای هرکدام از کاوشگرها و بدست آوردن ماتریس Aاز رابطه (۴)
- گام هفتم: تعیین موقعیت جدید کاوشگرها و تشکیل بردار اعداد حقیقی R جدید از رابطه (۳)
- گام هشتم: کنترل در محدوده مجاز بودن کاوشگرها و در صورت خارج از محدوده بودن هر کاوشگر، بازگرداندن آن به فضای تصمیم‌گیری با استفاده از روابط (۸) و (۹)
- گام نهم: کنترل همگرایی یا پایان زمان اجرای مدل. در صورت همگرا شدن یا پایان زمان مدل، رفتن به گام نهم و در غیر اینصورت بازگشت به گام سوم
- گام دهم: استخراج جواب بهینه از کاوشگر یا کاوشگرهایی که کمترین هزینه را در انتهای اجرا داشته اند.

برای اجرای مدل پیشنهادی بصورت گام به گام، یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار Matlab نوشته شده و با استفاده از آن بهینه‌سازی برای یک خط لوله واقعی انجام شده است.

مطالعه موردی

مطالعه موردی این پژوهش خط لوله انتقال آب به ظرفیت ۴ متر مکعب بر ثانیه درشهر تبریز در شمال غربی ایران است که آب را از مخزن سد شهید مدنی به رودخانه مهرانه رود انتقال می‌دهد. این طرح شامل یک ایستگاه پمپاژ در محل سد، و یک خط لوله به قطر mm۱۸۰۰ و طول ۸۰۷۰ متر است که در صورت خاموش شدن ناگهانی پمپ، اثرات ضربه قوچ بر روی آن قابل ملاحظه است. پروفیل طولی این خط انتقال در شکل(۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- پروفیل طولی خط لوله انتقال مطالعه موردی

تراز ایستگاه پمپاژ ۱۵۰۸/۵ متر و تراز انتهای خط لوله ۱۶۹۰ متر است. در طرح موجود این خط لوله، جهت حفاظت سیستم در برابر اثرات ضربه قوچ ناشی از خاموش شدن ناگهانی پمپ‌ها، از یک ایرچمبر در پایین دست ایستگاه پمپاژ و تعدادی شیر هوا با قطر روزنه یکسان در طول لوله استفاده شده است که هزینه آن بالغ بر ۱۴۵ هزار دلار است. مشخصات کلی ایستگاه پمپاژ، خط انتقال و تجهیزات محافظت در برابر ضربه قوچ طرح موجود بشرح جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات خط لوله

مشخصات ایستگاه پمپاژ		مشخصات خط لوله		مشخصات وسائل حفاظتی موجود			
نوع پمپ	Horizontal centrifuge	قطر لوله	1800 mm	حجم=20 m^3			مخزن هوای فشرده
تعداد پمپ ها	10	فشار حداکثر مجاز	33 bar		Inlet Pipe	Outlet Pipe	D (mm)
هد کل	205 m	جنس	Steel	شیرهای هوا	36	37	450
دبی کل	4 m^3/s	فشار بخار سیال	-0.85 bar		39	40	450
سرعت چرخشی هر پمپ	2150 rpm	ضخامت	16 mm		41	42	450
خطر خروجی	600 mm	سرعت موج	1027 m/s		43	44	450
					46	47	450
				قیمت کل سیستم حفاظتی موجود: $145,000			

در اینجا طرح حفاظت ترانزینت این خط لوله با استفاده از مدل ارائه شده بروش CFO، بهینه‌سازی شده است. همچنین این بهینه‌سازی یک بار دیگر و با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک GA تکرار شده است و نتایج حاصل از روش‌های CFO و GA با هم و نیز با طرح حفاظتی موجود مقایسه شده اند.

برای انجام بهینه‌سازی به هر دو روش، خط لوله به ۵۰ المان محاسباتی مطابق شکل (۴) بگونه‌ای تقسیم بندی شده که هر قطعه حتی‌الامکان بیشتر از۲۰۰متر طول نداشته باشد. همچنین باتوجه به امکانات موجود برای اجرای تجهیزات حفاظتی، هفت گزینه ایرچمبر و سه گزینه ایرولو با مشخصات و قیمت‌های نشان داده شده در جدول (۲) برای استفاده در بهینه‌سازی مدنظر قرار گرفته است.

جدول ۲- لیست تجاری شیرهای هوا و مخازن هوای فشرده

مخزن هوای فشرده		
هزینه($)	حجم(m^3)	شماره
50,000	8	1
55,000	10	2
100,000	20	3
250,000	25	4
300,000	30	5
340,000	35	6
367,000	40	7

شیر هوا		
هزینه($)	قطر (mm)	شماره
7,000	300	1
9,000	450	2
12,000	600	3

محل مخزن هوا بلافاصله بعد از پمپ در نظر گرفته شده است. با توجه به چند اجرای اولیه و اینکه مشخص شد ناحیه بحرانی برای فشارهای منفی، نیمه انتهایی خط لوله است، نقاط اتصال لوله‌های ۳۰ به بعد نیز برای قرارگیری شیرهای هوا کاندیدا شدند.

برای بهینه‌سازی با روش CFO از تعداد ۲ کاوشگر به ازای هر متغیر استفاده شده است و باتوجه به تعداد متغیرها که یک عدد برای ایرچمبر و ۱۹ عدد برای ایرولو هستند، تعداد ۴۰ کاوشگر درنظر گرفته شد.

برای توزیع اولیه کاوشگرها در فضای تصمیم‌گیری از سه روش توزیع یکنواخت، توزیع قطری و توزیع متعامد با γ های مختلف Formato 2011 استفاده شد. بهترین مقادیر برای سایر پارامترهای روش CFO نیز با آزمون و خطا بشرح جدول زیر بدست آمد و در مدل اعمال گردیدند:

جدول ۳- ترجیحات پارامترها در روش CFO

Preferences in CFO method
$for\ i = 1 (air\ chamber)$: $1 \le x_i \le 7$
$for\ i = 2\ to\ 20 (air\ valves)$: $0 \le x_i \le 3$
$F_{rep} = 0.3$
$\alpha = 1$
$\beta = 2$
$G = 2$

تعداد تکرار حداکثر برای الگوریتم نیز ۱۰۰۰ و معیار همگرایی، صفر شدن تمام درایه های ماتریس A درنظر گرفته شد.

برای اجرای مدل با روش GA از الگوریتم سلف ادپتیو Real GA با۸۰ کروموزوم، نرخ جهش زنی ۲درصد، روش زوج‌یابی باینری تورنمنت و روش تبادل ژنی BLX-α استفاده شد. حداکثر تعداد نسل مجاز برای اجرا در این روش نیز ۱۰۰۰ نسل درنظر گرفته شد.

بهترین نتیجه‌ی اجرای مدل با روش CFOبا قراردادن اولیه کاوشگرها به شکل متعامد بدست آمد. این نتیجه ایرچمبر به حجم ۱۰ متر مکعب و شش عدد ایرولو با قطرهای متفاوت است. با این طرح هزینه کل سیستم حفاظت برابر با ۱۰۱ هزار بدست آمد. نکته قابل توجه اینکه این نتیجه با جواب مدل به روش GA کاملاً یکسان است و هزینه این طرح بهینه نسبت به طرح موجود (۱۴۵هزار دلار) حدود سی درصد کمتر است. ضمن اینکه بجای استفاده از شیرهای هوا با قطر

یکسان، قطرهای بهینه در نقاط مختلف بدست آمده اند. جدول (۴) خلاصه نتایج طرح بهینه در GA و بهترین اجرای CFO را نشان می‌دهد.

جدول ٤ - مشخصات وسائل حفاظتی در طرح بهینه پیشنهادی

مخزن هوای فشرده	حجم=10 m^3		
	شماره لوله ورودی	شماره لوله خروجی	قطر(mm)
شیر هوا	31	32	300
	34	35	450
	37	38	300
	40	41	450
	43	44	300
	46	47	300
هزینه کل طرح حفاظت بهینه: $101,000			

در جدول (۵) نیز نتایج مدل با روش CFO برای روش‌های مختلف توزیع اولیه کاوشگرها نشان داده شده است.

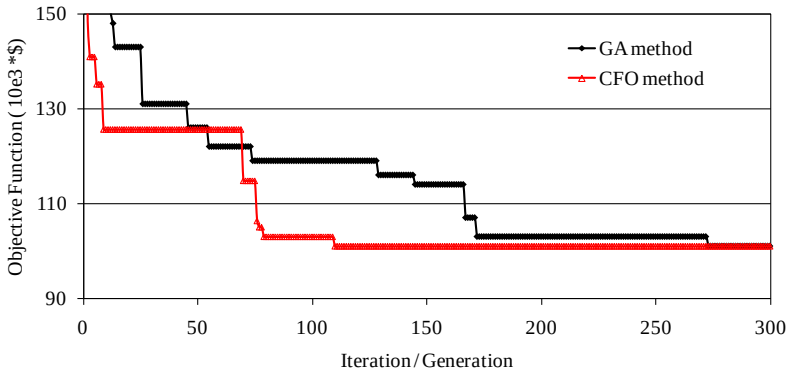
جدول ٥- نتایج مدل بهینه با استفاده از روش CFO

Run #	Initial Probe Distribution Meth.	# Iteration	Min. Cost
1	Uniform	97	108
2	Diagonal	146	103
3	Orthogonal ($\gamma = 0.1$)	57	120
4	Orthogonal ($\gamma = 0.2$)	41	160
5	Orthogonal ($\gamma = 0.3$)	49	183
6	Orthogonal ($\gamma = 0.4$)	69	139
7	Orthogonal ($\gamma = 0.5$)	71	111
8	Orthogonal ($\gamma = 0.6$)	48	132
9	Orthogonal ($\gamma = 0.7$)	78	132
10	Orthogonal ($\gamma = 0.8$)	109	101*
11	Orthogonal ($\gamma = 0.9$)	48	132
12	Orthogonal ($\gamma = 1$)	84	153

همانگونه که از جدول(۵) مشخص است، نتایج روش CFO کاملاً وابسته به نحوه توزیع اولیه کاوشگرها در فضای تصمیم‌گیری است. در ۱۲ اجرای مختلفی که در جدول فوق نشان داده شده، بهترین نتیجه مربوط به روش توزیع اولیه متعامد یکنواخت در هر جهت وبا پارامتر $\gamma = 0.8$ است که در آن مقدار تابع هدف برابر با ۱۰۱ و دقیقاً برابر با نتیجه روش GA

است. البته این نتیجه در مقایسه با سایر اجراهای CFO جدول (۵) با تعداد تکرارهای بیشتری بدست آمده است.

روند تغییرات تابع هدف در تکرارهای مختلف الگوریتم برای بهترین جواب روش CFO در مقایسه با روش GA در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- مقایسه روند بهینه سازی در روش CFO و GA

با توجه به اینکه تعداد مناسب کاوشگرها در روش CFO ۴۰ عدد و تعداد کروموزومهای کافی در روش GA ۸۰ عدد بدست آمده است، می‌توان گفت که حجم محاسبات روش CFO در هر تکرار نصف روش GA است. زیرا برای CFO در هرتکرار تحلیل ترانزینت ۴۰ بار باید انجام شود و در GA ۸۰ بار. از طرف دیگرهمانگونه که در شکل (۲) مشخص است، پاسخ روش CFO با ۱۰۹ تکرار و پاسخ GA با ۲۷۰ تکرار بدست می‌آید. لذا با درنظر گرفتن حجم محاسبات دوبرابری GA نسبت به CFO ، می توان نتیجه گرفت که در این مساله بهینه‌سازی خط لوله، روش CFO حدود ۲۱ درصد روش GA زمان می برد. لذا روشی بسیار سریعتر از GA است. از طرف دیگر باتوجه به اینکه GA یک روش استوکاستیک است، در تمام اجراها، پاسخ بهینه گلوبال را در تعداد تکرارهای یکسان نمی‌دهد. با اجراهایی که در این مطالعه موردی برای GA انجام شد، تعداد تکرار برای رسیدن به بهینه گلوبال از ۲۵۰ تا ۳۹۵ متغییر بود. این درحالی است که روش CFO بدلیل دترمنیستیک بودن، پاسخ گلوبال را در تمام اجراها برای بهترین روش توزیع اولیه کاوشگرها، در تکرار ۱۰۹ تعیین می‌کند. البته همانگونه که در جدول(۵) دیده شد، روش CFO به موقعیت اولیه کاوشگرها حساس است. درواقع پاسخ نهایی آن وابسته به نقطه شروع محاسبات است و درصورتیکه این نقطه شروع مناسب انتخاب نشود، روش حتی ممکن است به پاسخ بهینه گلوبال نرسد. ضمن اینکه برای تعیین مقادیر مناسب برای پارامترهای F_{rep} ، α ، β و G نیاز به آزمون و خطا وجود دارد. که این نکات نقاط ضعف این روش نسبت به GA هستند.

نتیجه گیری

در این مطالعه استفاده از مدل بهینه‌سازی مبتنی بر روش CFO برای تعیین حجم مخزن هوای فشرده و تعداد، محل و نوع شیرهای هوا ارائه گردید و اثبات گردید که طراحی سیستم حفاظت در برابر ضربه قوچ در خطوط لوله با استفاده از چنین مدلی می‌تواند جهت کاهش هزینه ضمن رعایت معیارهای طراحی بسیار مفید باشد. یکی از نقاط قوت روش پیشنهادی این است که حداقل‌سازی هزینه‌ها در کنار کنترل فشارهای سیستم در حدود مجاز، در یک تابع هدف تعریف می‌شوند و بهینه‌سازی تک هدفه، یک پاسخ واحد را بعنوان طرح بهینه با رعایت کامل ملاحظات هیدرولیکی ارائه

می‌دهد. در مدل بهینه‌سازی بکار رفته، استفاده از روش CFO با روش GA مقایسه گردید و مشخص شد که CFO با سرعت بسیار بالاتر و با زمانی حدود یک پنجم GAمی‌تواند دارای مزیت مهمی باشد. این نکته بخصوص در خطوط لوله با طول بسیار زیاد می‌تواند بسیار مفید بوده و مدل را بسیار سریعتر کند. اگر چه روش CFO بدلیل وابسته بودن به نقطه شروع محاسبات دارای محدودیت‌هایی نیز هست، ولی با استفاده از روش توزیع اولیه متعامد کاوشگرها می‌توان تاحدودی در مساله خط لوله بر این محدودیت فائق آمد. البته در هرحال تعیین پارامترهایی مانند γ ، α F_{rep} ، β و G چالشهای روش CFO هستند.

منابع

Chaudhry,M.H., (2014). “Applied Hydraulic Transients” Springer, New York Heidelberg Dordrecht London.

Fathi-Moghaddam,M., Haghighipour,S., Samani,H.M.V., (2013). “Design-Variable Optimization of Hydropower Tunnels and Surge Tanks Using a Genetic Algorithm” J. Water Resour. Plann. Manage. Vol.139, pp.200-208.

Formato. R.A, (2007). “Central Force Optimization: A New Metaheuristic With Application in Applied Electromagnetics” Progress In Electromagnetics Research, PIER, Vol.77, pp.425–491.

Formato. R.A, (2011). “Central Force Optimization with variable initial probes and adaptive decision space” Applied Mathematics and Computation, Vol.210, pp.8866-8872.

Jung,B.S., Boulos,P.F, Altman, T., (2011). “Optimal Transient Network Design: A Multi-Objective Approach” J of American Water Works Association, vol. 103-4, pp. 118-127.

Jung,B.S., and Karney,B.W. (2006). “Hydraulic Optimization of Transient Protection Devices Using GA and PSO Approaches” J. Water Resour. Plann. Manage. 2006.vol.132, pp.44-52.

Jung. B.S., Karney. B.W., (2004). " Fluid transients and pipeline optimization using GA and PSO: the diameter connection " , Urban Water Journal, vol.1(2), pp.167-176.

Jung. B.S, Karney. B., (2013). " Pipeline Optimization Accounting for Transient Conditions: Exploring the Connections between System Configuration, Operation and Surge Protection ", World Environmental and Water Resources Congress, ASCE, pp.903-912.

Jung. B.S., Muleta. M., Boulos. P.F, (2009). " Multi-objective Design of Transient Network Models ", World Environmental and Water Resources Congress, ASCE, pp.5698-5707.

Laine. D.A., Karney. B.W., (1997)." Transient analysis and optimization in pipeline-a numerical exploration ", Proc. 3rd International Conference on Water Pipeline Systems, Hague, Netherlands, pp.281-296.

Lingireddy. S., Funk. J.E ., Wang. H., (2000). "Genetic algorithms in optimizing transient suppression devices " , Proc. ASCE 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management, Minneapolis.

Stephenson,D. (2002). “Simple Guide for Design of Air Vessels for Water Hammer Protection of Pumping Lines” J of Hydraulic engineering, vol. 28, pp. 792-797.

Wang,L., Wang,F.J., Zou,Z.C., Li,X.N., Zhang,J.C., (2013). “ Effects of air vessel on water hammer in high-head pumping station” 6th Int. Con. on Pumps and Fans with Compressors and WindTurbines 2013 IOP.

Wylie,E.B., and Streeter,V.L., (1993). “Fluid Transients in Systems” Prentice Hall, New Jersey.