

## توسعه مدلی کاربردی برای بهینه‌سازی مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا در سامانه‌های انتقال آب

عبدالرحیم جمال<sup>۱\*</sup>، محسن نجارچی<sup>۱</sup> و سیدمحمد مهدی نجفی‌زاده<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۹)

### چکیده

از متداول‌ترین راه‌های مقابله با ضربه قوچ و کاویتاسیون در سامانه‌های انتقال آب، استفاده از مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا است طراحی بهینه این دو تجهیز حفاظتی می‌تواند اقدامی مؤثر در کاهش هزینه‌های مربوط به ساخت و بهره‌برداری از یک سامانه انتقال آب محسوب شود. در این مقاله، نرم‌افزاری کاربردی با قابلیت شبیه‌سازی و بهینه‌سازی همزمان این تجهیزات حفاظتی ارائه شده است. برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی سامانه در شرایط گذرا از روش خطوط مشخصه و برای بهینه‌یابی تعداد، ابعاد و موقعیت قرارگیری مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. قیود و محدودیت‌های این مسئله بهینه‌سازی شامل کنترل فشارهای منفی و مثبت در محدوده مجاز برای جلوگیری از وقوع کاویتاسیون و ضربه قوچ است برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، یک سامانه انتقال آب مشهور در تحقیقات پیشین، به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی، علاوه بر آنکه حداقل و حداکثر فشار در گره‌های سامانه را به مقادیر مطمئن‌تری می‌رساند، هزینه‌های مربوط به ساخت مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا را نیز ۱۷ درصد کاهش داده است.

واژه‌های کلیدی: ضربه قوچ، کاویتاسیون، مخزن ضربه‌گیر، محفظه هوا

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک، اراک
  ۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک، اراک
- \*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: a.jamal91@iau-arak.ac.ir

## مقدمه

ضربه قوچ یک پدیده گذرای ناخواسته و مخرب در هیدرولیک سامانه‌های انتقال آب به‌شمار می‌رود (۱، ۹ و ۴۰). این پدیده زمانی رخ می‌دهد که تعادل یک سیستم جریان، در اثر تغییر وضعیت در یک دوره به‌نسبت کوتاه زمانی، دچار اختلال شود (۱۶ و ۱۷). عمومی‌ترین تغییر وضعیت برای رخدادهای ضربه قوچ در مورد خطوط پمپاژ، قطع برق و خاموش شدن ناگهانی الکتروموتور پمپ است (۱۰). ضربه قوچ سبب متراکم شدن سیال و انبساط حجمی لوله می‌شود و در مواقعی که لوله‌ها از مقاومت کافی برخوردار نباشند، منجر به شکستگی لوله‌ها خواهد شد (۲).

استفاده از مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا، برای حفاظت از سامانه‌های انتقال آب در برابر اثرات ضربه قوچ، از متداول‌ترین و مؤثرترین روش‌ها است (۵ و ۳۶). مخزن ضربه‌گیر، به‌عنوان یک منبع پایدار کننده جریان گذرا، حجم آب مورد نیاز در خطوط لوله را برای مقابله با ضربه قوچ تأمین می‌کند (۶ و ۲۷). محفظه هوا، نه فقط فشارهای منفی را کنترل و با جدایش ستون سیال مقابله می‌کند، بلکه در برابر فشارهای مثبت اضافی نیز کارایی دارد (۳۶). اما این دو تجهیز حفاظتی گران هستند و لذا طراحی اقتصادی و بهینه آنها در خور توجه است (۲۰).

با توجه به پیچیدگی معادلات حاکم بر شرایط جریان گذرا و تعداد و نیز محدوده وسیع تغییرات متغیرهای تصمیم برای طراحی این تجهیزات، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی اجتناب‌ناپذیر است (۳۲-۳۵). الگوریتم‌های کلاسیک (gradient-based) عموماً قادر به حل چنین مسائلی نیستند و اغلب به‌جای جواب‌های عمومی، به جواب‌های محلی و موضعی منجر می‌شوند (۳ و ۴). برای حل چنین مسائلی، روش‌های متعددی به‌وسیله پژوهشگران توسعه یافته است. از این جمله می‌توان به روش تحلیل احتمالاتی (۱۲)، شبکه عصبی (۱۸، ۳۰ و ۴۰) و روش برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی (SQP) (۳۷)، اشاره کرد. با این حال برای طراحی بهینه

تجهیزات حفاظتی، الگوریتم‌های فرا ابتکاری نظیر GA، PSO و ... توسط بسیاری از پژوهشگران، مؤثرتر و منعطف‌تر ارزیابی شده‌اند. به‌عنوان مثال، جانگ و کارنی (۲۰۰۶) عملکرد دو الگوریتم PSO و GA را در طراحی بهینه ابعاد یک مخزن ضربه‌گیر در یک سیستم انتقال آب ثقلی، با یکدیگر مقایسه کردند و البته در نهایت مشاهده کردند که الگوریتم ژنتیک نسبت به روش PSO نتایج بهتری ارائه کرده است (۲۲). همچنین در همین راستا، می‌توان به مطالعات کیم (۲۰۱۰) اشاره کرد که با تلفیق روش پاسخ ضربه (Impulse Response Method) و الگوریتم ژنتیک، مدلی برای طراحی بهینه موقعیت، طول و قطر مخزن ضربه‌گیر ارائه کردند (۲۳). تانگ و صمد (۲۰۱۲) نیز کاربرد موفقیت‌آمیز الگوریتم ژنتیک را در انتخاب بهینه تعداد، سایز و موقعیت شیرهای هوا در سامانه انتقال آب به‌منظور مقابله با اثرات ضربه قوچ گزارش کردند (۳۹). الگوریتم ژنتیک فازی نیز رهیافت چمنی و همکاران (۲۰۱۳) برای طراحی بهینه تجهیزات حفاظت از سامانه انتقال آب در برابر کاویتاسیون بود. ایشان عملکرد دو سیستم استنتاج فازی ممدانی و سوگونو را در تلفیق با الگوریتم ژنتیک، بررسی و مقایسه کردند. قید طراحی آنها فشارهای منفی و پارامترهای طراحی آنها شامل تعداد، سایز و موقعیت مخازن ضربه‌گیر و محفظه هوا بود (۷). جمال و همکاران (۲۰۱۶) نیز پارامترهای هیدرولیکی مربوط به یک محفظه هوا در سامانه انتقال آب دهگلان به دشت فروه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌یابی کردند (۱۹). در نهایت جزایری مقدس و همکاران (۲۰۱۷) نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک، موقعیت و مشخصات محفظه و شیرهای هوا را در سامانه انتقال آب غدیر به منظور مقابله با ضربه قوچ، بهینه‌یابی کردند (۲۰).

کاربرد گسترده و موفقیت‌آمیز الگوریتم ژنتیک در طراحی تجهیزات حفاظتی، سبب شده که در این مقاله نیز از الگوریتم ژنتیک برای طراحی مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا استفاده شود. اما طراحی بهینه و همزمان این دو تجهیز حفاظتی پرکاربرد و در نظر داشتن اندرکنش رفتار هیدرولیکی این دو، موضوعی است که پیش از این کمتر مورد بررسی قرار

سرعت موج در لوله است که از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود (۸):

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + [(K/E)(D/e)]}} \quad (۳)$$

که در رابطه فوق،  $K$ ،  $E$  و  $e$  به ترتیب مدول بالک، مدول الاستیسیته و ضخامت لوله هستند.

از آنجا که معادلات پیوستگی جرم و اندازه حرکت به صورت دیفرانسیل جزئی و هایپربولیک غیرخطی هستند، عموماً حل تحلیلی ندارند و برای حل آنها ناگزیر به استفاده از روش‌های عددی مانند خطوط مشخصه، اجزای محدود، احجام محدود و ... هستیم (۲۱). یکی از متداول‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های حل معادلات جریان گذرا، روش خطوط مشخصه است که از قابلیت حل عددی با استفاده از رایانه برخوردار است و شرایط مرزی مختلف سیستم انتقال را می‌توان بدون پیچیدگی خاصی در این روش اعمال کرد. اساس روش خطوط مشخصه، بر تبدیل معادلات دیفرانسیل جزئی به معادلات دیفرانسیل کامل است (۲۵). بر اساس این روش، سیستم خط لوله به تعداد محدودی گره (Node) تقسیم می‌شود که شامل گره‌های داخلی و نقاط مرزی است در هر گره و در هر گام زمانی، دو مجهول دبی و هد با استفاده از مقادیر به دست آمده از گام زمانی قبل، محاسبه می‌شوند (۸). با استفاده از روش خطوط مشخصه، معادلات جریان گذرا برای هر گره داخلی مطابق روابط زیر به دست می‌آید (۲۶):

$$Q_i^{n+1} = \frac{1}{2} \left[ \frac{(Q_{i-1}^n + Q_{i+1}^n) + \frac{gA}{a}(H_{i-1}^n - H_{i+1}^n) + \frac{g}{a} \Delta t (Q_{i-1}^n - Q_{i+1}^n) \sin \alpha - \frac{f \Delta t}{2DA^2} (Q_{i-1}^n |Q_{i-1}^n| + Q_{i+1}^n |Q_{i+1}^n|) \right] \quad (۴)$$

$$H_i^{n+1} = \frac{1}{2} \left[ \frac{(H_{i-1}^n + H_{i+1}^n) + \frac{a}{gA} (Q_{i-1}^n - Q_{i+1}^n) + \frac{\Delta t}{A} (Q_{i-1}^n + Q_{i+1}^n) \sin \alpha - \frac{a}{g} \frac{f \Delta t}{2DA^2} (Q_{i-1}^n |Q_{i-1}^n| + Q_{i+1}^n |Q_{i+1}^n|) \right] \quad (۵)$$

که در این روابط،  $H_i^{n+1}$  و  $Q_i^{n+1}$  به ترتیب مقادیر هد و دبی در هر گره متناسب با گام زمانی هستند. بالانویس  $n+1$  بیانگر

گرفته است. لذا هدف از این مقاله، توسعه نرم‌افزاری است که ضمن آنکه توانایی شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی اجزای مختلف سامانه‌های انتقال آب شامل مخزن، لوله‌ها، پمپ و تجهیزات حفاظتی را، به روش خطوط مشخصه در شرایط ماندگار و گذرا دارد، به کاربر قابلیت طراحی بهینه و همزمان مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا را با استفاده الگوریتم ژنتیک می‌دهد. عامل ایجاد جریان گذرا در این نرم‌افزار، محتمل‌ترین سناریو یعنی از کار افتادن ناگهانی الکتروموتور پمپ است نکته قابل توجه دیگر در این نرم‌افزار، تلفیق (Integration) قابلیت شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با یکدیگر است که این مسئله دقت و سرعت محاسبات را افزایش می‌دهد. تعداد، موقعیت و سایز مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا، متغیرهای طراحی در فرایند حداقل‌سازی هزینه‌ها هستند. فشار و سرعت، فیود و محدودیت‌های این طراحی هستند که در تمام طول سامانه نباید از مقادیر مجاز معرفی شده توسط کاربر تجاوز کنند. این مهم با تعریف و اعمال تابع جریمه (پنالتی) انجام می‌پذیرد. رهیافت این مقاله، ایمنی سامانه‌های انتقال آب را در برابر ضربه قوچ تضمین کرده و از سوی دیگر، هزینه‌های مربوط به ساخت مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا را مدیریت می‌کند.

## مواد و روش‌ها

### تحلیل جریان گذرا در سامانه‌های انتقال آب

برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی سامانه‌های انتقال آب در شرایط گذرا، جفت معادلات اندازه حرکت و پیوستگی جرم (معادلات ۱ و ۲) در یک حجم کنترل به کار برده می‌شوند (۴۲):

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (۲)$$

در روابط فوق،  $H$  هد استاتیکی و  $V$  سرعت جریان در لوله است که هر دو این پارامترها، تابعی از موقعیت در راستای طولی لوله ( $x$ ) و زمان ( $t$ ) هستند. همچنین در این روابط،  $g$  شتاب جاذبه،  $D$  قطر لوله،  $f$  ضریب دارسی-وایسباخ و  $a$

رسیدن به جواب بهینه محلی، به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (۱۵).

در زمانی که اهداف یک مسئله بهینه‌سازی در تضاد با یکدیگر باشند، برقراری توازن بین اهداف موضوع مهمی است. این موضوع می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه پاسخ داده شود (۱۱). لذا در حقیقت هدف از یک الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه، رسیدن به یک طرح بهینه نیست، بلکه تولید مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه، متناسب با تعریف جبهه پارتو است (۲۸). اما در این مقاله، با توجه به از پیش معین بودن ماکزیمم و مینیمم فشار مجاز در خطوط لوله، از بهینه‌سازی تک‌هدفه با در نظر گرفتن تابع جریمه، برای به حداقل رساندن هزینه ساخت تجهیزات حفاظتی، استفاده می‌شود.

برای پیاده‌سازی تکنیک الگوریتم ژنتیک، پارامترهایی مانند تعداد جمعیت، احتمال تزویج و جهش باید از پیش تعیین شوند. براساس تجربیات قبلی، مقادیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک، مانند تعداد جمعیت، احتمال تزویج و جهش، به ترتیب برابر با ۱۰۰، ۰/۷ و ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است (۳۱). شکل ۱ روند نمای عملکرد تلفیقی مدل شبیه‌ساز و الگوریتم ژنتیک را برای طراحی محفظه هوا و مخزن ضربه‌گیر نشان می‌دهد. بر این اساس، در ابتدا نسل یا جمعیت اولیه‌ای از کروموزوم‌ها تولید می‌شود. هر کروموزوم در برگزیده متغیرهای تصمیم مسئله یا اصطلاحاً ژن‌ها است که بر اساس محدوده تغییرات مجازی که کاربر معین می‌کند، توسط نرم‌افزار به‌طور تصادفی مقداردهی و کدگذاری می‌شوند. آنگاه به‌ازای هر رشته از جواب‌ها، ابتدا مقدار اولیه تابع هدف محاسبه می‌شود و سپس یک تحلیل جریان غیرماندگار انجام می‌شود که بر اساس آن، مقادیر اکسترمم فشار و سرعت در طول سامانه محاسبه می‌شوند. چنانچه مقادیر فشار و سرعت محاسبه شده، از حد مجازی که توسط کاربر تعریف شده است تجاوز کند، با اعمال جریمه، مقدار اولیه تابع هدف افزایش می‌یابد. سپس میزان مطلوبیت هر رشته جواب در نسل اول مشخص می‌شود. در ادامه، توسط

مجهولات است و زیرنویس  $i$  شماره هر گره را در راستای طولی لوله نشان می‌دهد.  $A$  سطح مقطع لوله،  $\Delta t$  گام زمانی است (۲۴).

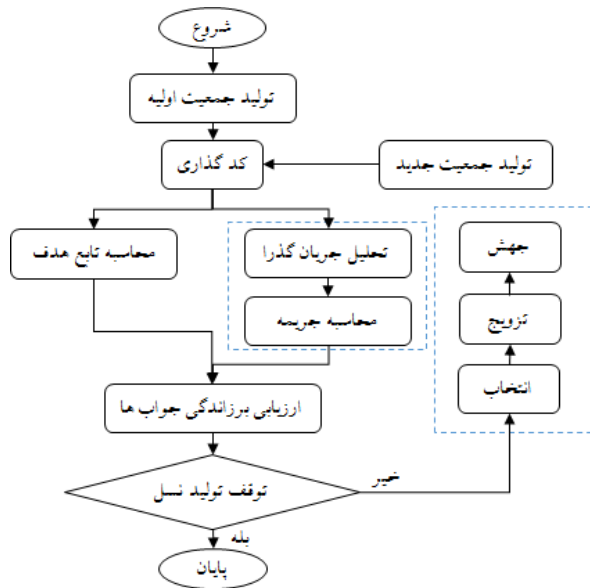
گره‌هایی به جز گره‌های داخلی که شامل مخازن، شیرآلات، پمپ‌ها و تجهیزات حفاظتی مانند محفظه هوا و مخزن ضربه‌گیر و غیره هستند، شرایط مرزی نامیده می‌شوند. بررسی شرایط مرزی مختلف و چگونگی استنتاج معادلات حاکم بر آنها، به‌طور کامل در مرجع (۴۱) و (۲۶) ارائه شده است. لازم به ذکر است که برای همگرایی نتایج روش خطوط مشخصه در سیستم چند لوله‌ای، باید شرط کورانت به فرم زیر در تمام لوله‌ها برقرار باشد:

$$C_r = \left( \frac{a \Delta t}{\Delta x} \right)_j \leq 1, j = 1..N_p \quad (6)$$

در رابطه بالا  $C_r$  عدد کورانت،  $j$  اندیس مربوط به شماره هر لوله،  $N_p$  تعداد کل لوله‌ها و  $\Delta t_j, \Delta x_j, a_j$  به ترتیب مقادیر سرعت موج، گام زمانی و گام مکانی در هر لوله هستند. هر چه عدد کورانت به یک نزدیک‌تر باشد، نتایج از پایداری بیشتری برخوردارند. بدین منظور، گام مکانی (حداقل تقسیمات لوله) به‌عنوان معلوم در نظر گرفته می‌شود و سپس برای تمام لوله‌ها، گام زمانی طبق رابطه فوق و با فرض کورانت برابر یک، محاسبه می‌شود و در نهایت برای تمام سامانه، از کمترین گام زمانی به‌دست آمده استفاده می‌شود.

### مرور مختصری بر الگوریتم ژنتیک

تاکنون الگوریتم‌های متعددی نظیر الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده (simulated annealing)، جستجوی تابو، الگوریتم مورچگان، جستجوی هارمونی و الگوریتم کلونی زنبور عسل برای طراحی بهینه سامانه‌های انتقال آب پیشنهاد شده‌اند (۱۴). با این حال، شناخته شده‌ترین و پرکاربردترین پارادایم در الگوریتم‌های محاسبات فرا ابتکاری، الگوریتم ژنتیک است (۲۱ و ۲۳). الگوریتم ژنتیک با جمعیتی از جواب‌های بالقوه یا کروموزوم کار می‌کند و در طول جستجو و در طی نسل‌های متمادی، جواب‌های مسئله بهبود می‌یابند، به‌گونه‌ای که احتمال



شکل ۱. روند نمای فرایند طراحی با الگوریتم ژنتیک

به ترتیب قطر و ارتفاع مخزن ضربه‌گیر هستند.  $C'_{Air}$  و  $C'_{Surge}$  هزینه واحد ساخت هر متر مترمکعب محفظه هوا و مخزن ضربه‌گیر هستند.

قیود این مسئله، شامل محدودیت‌هایی فیزیکی و محدودیت‌های اجرایی هستند. محدودیت‌های اجرایی شامل ابعاد و موقعیت‌های ممکن و قابل قبول برای محفظه‌های هوا و مخازن ضربه‌گیر است محدودیت‌های فیزیکی که برای تعیین رفتار هیدرولیکی سامانه در طول فرایند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند، شامل معادلات خطوط مشخصه برای گره‌های داخلی و مرزی هستند که در بخش قبل توضیح داده شدند.

هنگامی که ماکزیمم و مینیمم هد (هدهای بحرانی) در سامانه نگران کننده باشد، تابع جریمه برای جلوگیری از جستجوی الگوریتم بهینه‌ساز در فضاهای غیر قابل، وارد می‌شود (۱۳) و (۲۹). در چنین شرایطی که میزان تخلف از قیود مسئله قابل ملاحظه است، یک ترم جریمه به تابع هدف اضافه می‌شود، که در این مقاله مطابق رابطه زیر است:

$$\text{Min.f}_{\text{penalty}} = pc \sum_{i=1}^{NP} \max \{ |h(t) - h_T| \} \quad (9)$$

عملگرهای جهش و توزیع، از رشته‌های جواب‌های برتر نسل قبلی برای تولید رشته جواب‌های نسل حاضر استفاده می‌شود و این فرایند تا آخرین نسل ادامه می‌یابد. در بخش بعد، نحوه پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک و چگونگی کار با نرم‌افزار توضیح داده خواهد شد.

### پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک

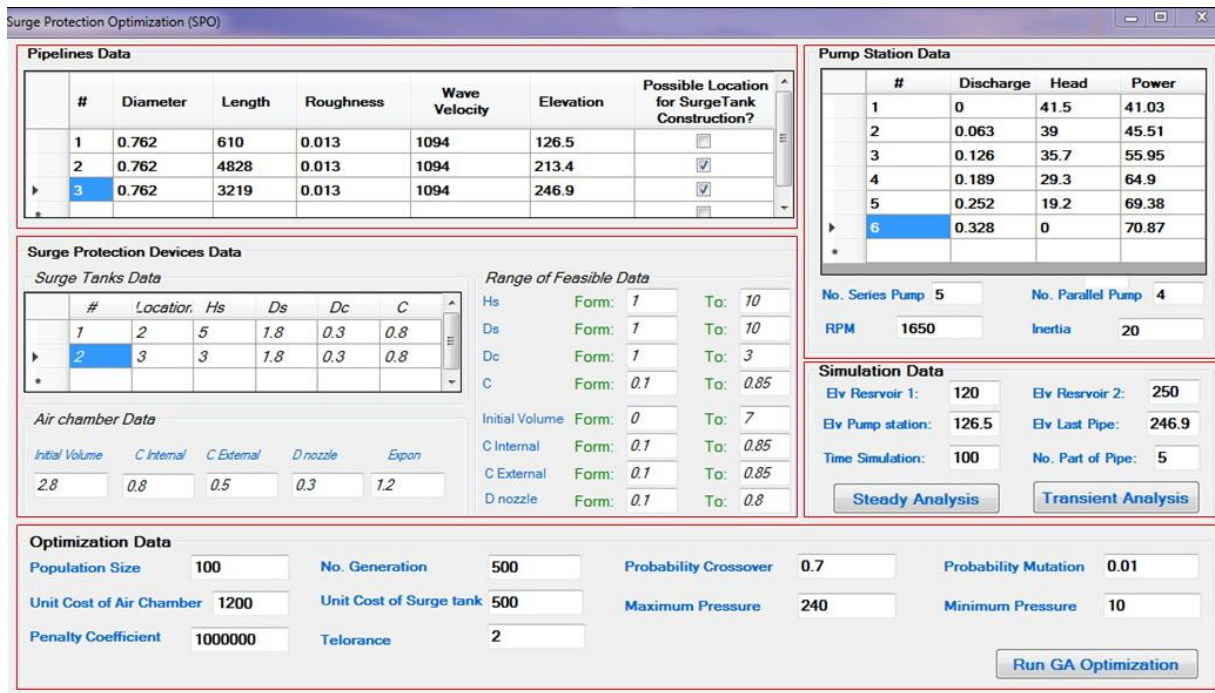
طراحی بهینه مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا، یک مبحث کاربردی در حوزه مهندسی آب به‌شمار می‌آید. این مقاله، به‌منظور دستیابی به حداکثر ایمنی و حداقل هزینه در سامانه‌های انتقال آب، به تعیین بهینه تعداد، موقعیت و گنجایش محفظه‌های هوا و مخازن ضربه‌گیر می‌پردازد. هزینه ساخت این تجهیزات حفاظتی در قالب تابع هدف زیر تعریف شده است:

$$\text{Min.f}_{\text{construction}} = \sum (C_{Air} + C_{Surge}) \quad (6)$$

$$C_{Air} = C'_{Air} \forall_{Air} \quad (7)$$

$$C_{Surge} = C'_{Surge} \frac{\pi}{4} D_s^2 h_s \quad (8)$$

که در این روابط،  $C_{Air}$  و  $C_{Surge}$  عبارتند از هزینه ساخت محفظه هوا و مخزن ضربه‌گیر که هر دو آنها تابعی از حجم مخازن‌شان هستند.  $\forall_{Air}$  حجم محفظه هوا،  $D_s$  و  $h_s$  نیز



شکل ۲. صفحه ورود اطلاعات به مدل پیشنهادی

Pipelines Data							
#	Diameter	Length	Roughness	Wave Velocity	Elevation	Possible Location for Surge Tank Construction?	
1	0.762	610	0.013	1094	126.5	<input type="checkbox"/>	
2	0.762	4828	0.013	1094	213.4	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	0.762	3219	0.013	1094	246.9	<input checked="" type="checkbox"/>	

شکل ۳. نمایش ورود مشخصات لوله‌ها در نرم‌افزار

برنامه‌نویسی شده است. در ادامه این بخش، به‌طور مختصر مراحل کار با این مدل مطابق آنچه در شکل ۲ آمده است، توضیح داده می‌شود:

گام اول: تعریف ویژگی‌های لوله‌ها مانند: قطر، طول، زبری، سرعت موج و ارتفاع مطابق شکل ۳ توسط کاربر برای نرم‌افزار تعریف می‌شوند. لازم به ذکر است که در این بخش، کاربر می‌تواند تنها لوله‌هایی را که احتمال می‌دهد موقعیت‌های مناسبی برای نصب مخزن ضربه‌گیر باشند را به مدل معرفی کند تا بدین ترتیب با کوچک شدن ابعاد مسئله تصمیم‌گیری، مدت زمان بهینه‌سازی نیز کاهش یابد.

که نماد  $|h|$  بیانگر قدرمطلق مقدار  $h(t)$  مقادیر هد پیش‌بینی شده در سری‌های زمانی و  $h_T$  هد مجاز است (۲۳).  $pc$  ضریب جریمه که در این مطالعه برابر با ۱۰۶ است مقادیر بالای جریمه، از حرکت به سمت جواب‌های غیر قابل قبول جلوگیری می‌کنند (۳۸). هزینه جریمه به هزینه ساخت تجهیزات اضافه می‌شود و در نهایت هزینه طراحی مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{cost} = f_{construction} + f_{penalty} \quad (10)$$

مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی این تحقیق مطابق توضیحات فوق در محیط ویزوال استادیو ورژن ۱۲،۰،۳۱۱۰۱،۰۰ آپدیت ۴،

#	Discharge	Head	Power
1	0	41.5	41.03
2	0.063	39	45.51
3	0.126	35.7	55.95
4	0.189	29.3	64.9
5	0.252	19.2	69.38
6	0.328	0	70.87

No. Series Pump: 5      No. Parallel Pump: 4  
 RPM: 1650      Inertia: 20

شکل ۴. نمایش ورود مشخصات پمپ‌ها در نرم‌افزار

Elv Reservoir 1:	120	Elv Reservoir 2:	250
Elv Pump station:	126.5	Elv Last Pipe:	246.9
Time Simulation:	100	No. Part of Pipe:	5

Steady Analysis      Transient Analysis

شکل ۵. نمایش ورود سایر مشخصات سامانه در نرم‌افزار

گام چهارم: مطابق شکل ۶، مشخصات مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا در این قسمت از نرم‌افزار تعریف می‌شوند. در خصوص مخازن ضربه‌گیر، مقادیری به‌عنوان محدوده قابل قبول برای پارامترهای ارتفاع مخازن، قطر مخزن اصلی آنها، قطر لوله اتصال ضریب آن باید وارد شود. برحسب تجربه می‌توان مقادیر مناسب برای این پارامترها را پیشنهاد داد و بدین ترتیب مدت زمان فرایند طراحی کاهش خواهد یافت. در صورت نداشتن تجربه لازم، بهتر است محدوده وسیع‌تری را برای این پارامترها در نظر گرفت. در خصوص محفظه هوا نیز مقادیری به‌عنوان محدوده قابل قبول برای حجم محفظه هوا، قطر لوله نازل و ضرایب آن باید وارد کرد. همچنین در صورتی که کاربر تنها بخواهد از قابلیت تحلیل نرم‌افزار استفاده کند، کافی است مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای مذکور را در قسمت سمت چپ وارد کند.

گام دوم: مطابق شکل ۴، مشخصات پمپ‌های سامانه توسط کاربر به نرم‌افزار داده می‌شود. این مشخصات شامل تعداد پمپ‌های موازی، تعداد طبقات پمپ‌ها، سرعت دوران پمپ در حالت عادی برحسب دور بر دقیقه و همچنین اینرسی پمپ برحسب کیلوگرم متر (برای هر پمپ اینرسی خاصی وجود دارد که در کاتالوگ آن قید شده است) است همچنین شش نقطه از منحنی عملکرد پمپ نیز باید در این قسمت وارد شود. در این قسمت دبی‌ها برحسب مترمکعب بر ثانیه، هد برحسب متر و توان برحسب کیلووات وارد می‌شوند.

گام سوم: اطلاعاتی مانند تراز مخازن آبده و آبگیر، تراز پمپ‌ها و آخرین لوله، مدت زمان شبیه‌سازی و حداقل تعداد تقسیمات لوله برای آنالیزهای ماندگار و غیرماندگار، مطابق شکل ۵ در این قسمت به نرم‌افزار معرفی می‌شود.

Surge Protection Devices Data						
Surge Tanks Data						
#	Location	Hs	Ds	Dc	C	
1	2	5	1.8	0.3	0.8	
2	3	3	1.8	0.3	0.8	
*						

Range of Feasible Data		
Hs	Form: 7	To: 10
Ds	Form: 7	To: 10
Dc	Form: 7	To: 3
C	Form: 0.1	To: 0.85
Initial Volume	Form: 0	To: 7
C Internal	Form: 0.1	To: 0.85
C External	Form: 0.1	To: 0.85
D nozzle	Form: 0.1	To: 0.8

Air chamber Data				
Initial Volume	C Internal	C External	D nozzle	Expon
2.8	0.8	0.5	0.3	1.2

شکل ۶. نمایش ورود اطلاعات مربوط به مخازن ضربه‌گیر و محفظه هوا در نرم‌افزار

Optimization Data			
Population Size	100	No. Generation	500
Unit Cost of Air Chamber	1200	Unit Cost of Surge tank	500
Penalty Coefficient	1000000	Tolerance	2
Probability Crossover	0.7	Probability Mutation	0.01
Maximum Pressure	240	Minimum Pressure	10
<input type="button" value="Run GA Optimization"/>			

شکل ۷. نمایش ورود اطلاعات مربوط به الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار

۱۰۰۶ متر بر ثانیه است. لاروک و همکاران در سال ۱۹۹۹، جریان غیرماندگار رخ داده در این سامانه را تحلیل کرده و برای کنترل آن، در طی یک فرایند سعی و خطا، ترکیبی از محفظه هوا و مخازن ضربه‌گیر را مطابق شکل ۸ و جدول ۱ پیشنهاد کردند. چمنی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۳، مخازن ضربه‌گیر و محفظه هوای این سامانه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک فازی، بهینه‌یابی کردند (جدول ۱). در اینجا، ضمن اشاره به نتایج کار این دو دسته از پژوهشگران، عملکرد نرم‌افزار معرفی شده در این مقاله، در دو حوزه شبیه‌سازی جریان غیرماندگار و بهینه‌سازی مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا، مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرد.

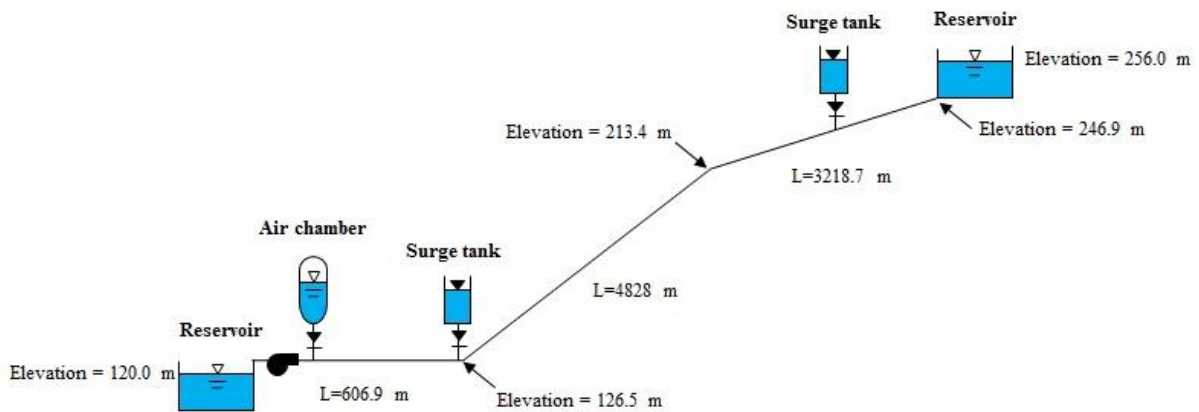
بر اساس مطالعه لاروک و همکاران، سناریوی اصلی عامل ایجاد جریان غیرماندگار در این سامانه، قطع ناگهانی پمپاژ است بر این اساس، ایشان جریان غیرماندگار رخ داده در این سامانه را بر پایه روش خطوط مشخصه تحلیل کردند مقادیر بیشینه و کمینه هد کل را در طول سامانه مطابق شکل ۹ و ۱۰ ارائه کردند.

گام پنجم: مطابق شکل ۷، پارامترهای بهینه‌سازی شامل تعداد جمعیت، تعداد نسل‌ها، احتمال تزویج و جهش و ضریب جریمه، ماکزیمم و مینیمم فشار مجاز و هزینه واحد ساخت یک متر مکعب مخزن ضربه‌گیر و محفظه هوا در این قسمت از نرم‌افزار تعریف می‌شوند. مقادیر  $C'_{Air}$  و  $C'_{Surge}$  بر اساس کاتالوگ شرکت‌های سازنده این تجهیزات تخمین زده می‌شوند. بر این اساس مقادیر مذکور به ترتیب ۱۸۰۰ و ۶۰۰ دلار در نظر گرفته می‌شوند. در بخش بعد، عملکرد مدل پیشنهادی در قالب یک مطالعه موردی، ارزیابی می‌شود.

## نتایج و بحث

در این بخش از مقاله، عملکرد نرم‌افزار در قالب یک مطالعه موردی، بررسی می‌شود. سامانه انتقال آبی که به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است، شامل سه خط لوله، در مجموع به طول ۸۶۵۷ متر، برای انتقال ۶۹۴ لیتر بر ثانیه آب است قطر لوله‌ها، ضریب زبری داریسی-وایسباخ و سرعت موج در همه لوله‌ها یکسان و به ترتیب برابر با ۷۶/۲ سانتی‌متر، ۰/۰۱۳ و

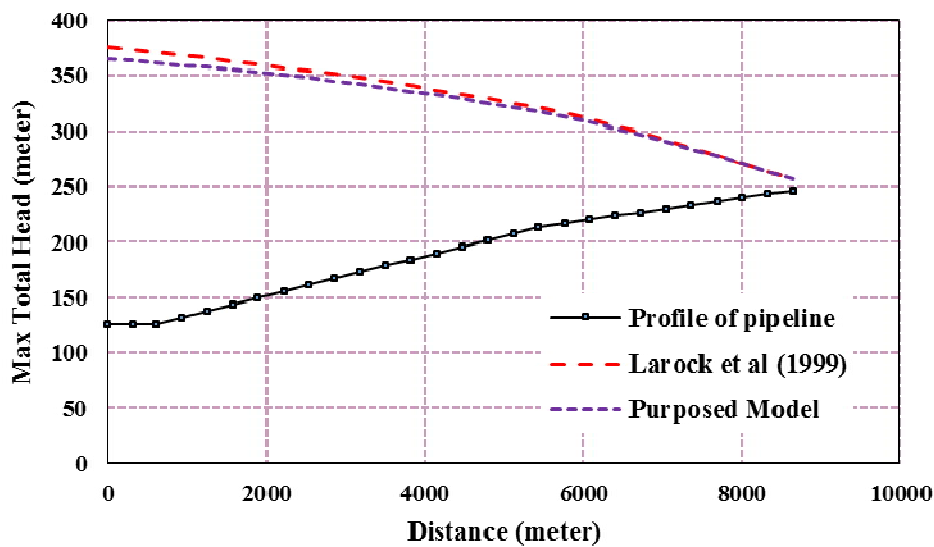




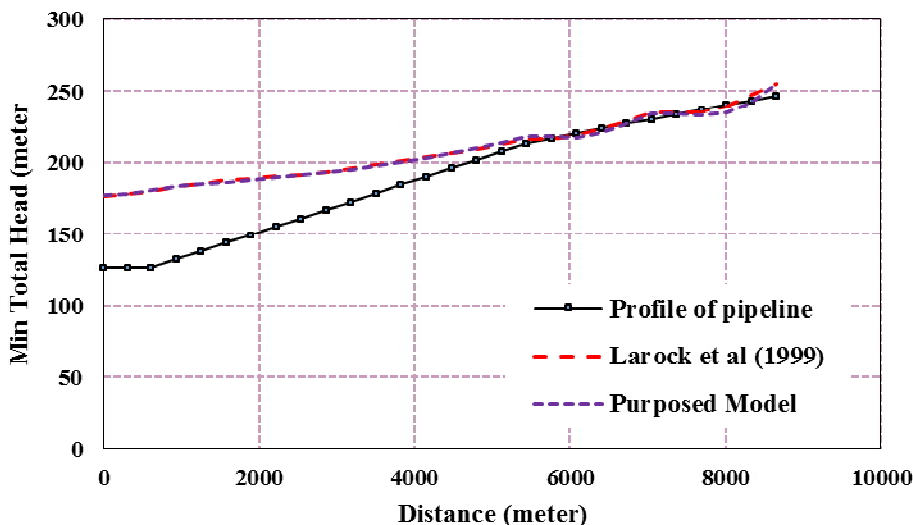
شکل ۸. نمادین سامانه انتقال آب مورد مطالعه (۲۶)

جدول ۱. مقایسه نتایج طراحی‌های مختلف مخازن ضربه‌گیر و محفظه هوا در سامانه انتقال آب مورد مطالعه

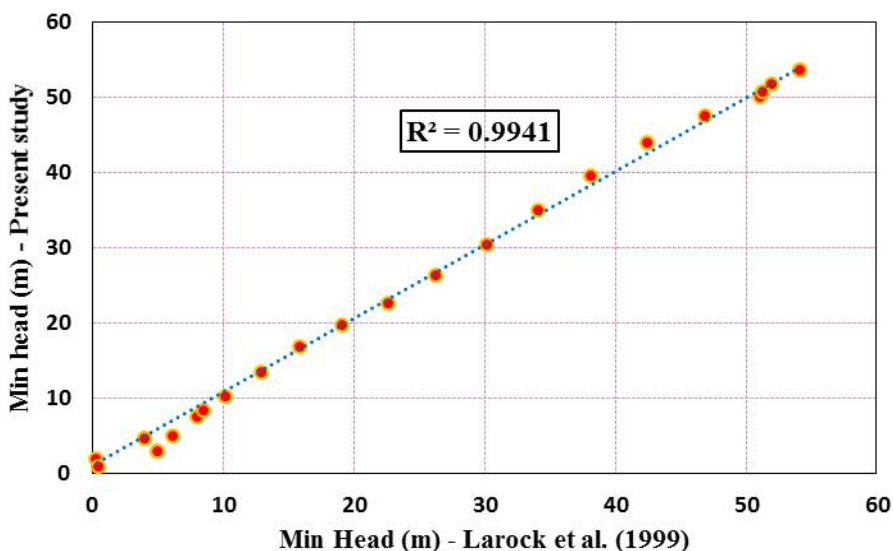
هزینه کل (دلار)	مینیمم هد	ماکزیمم هد	مشخصات مخزن ضربه‌گیر ۲	مشخصات مخزن ضربه‌گیر ۱	حجم محفظه هوا	روش
۴۲۱۰۹	$H_{\min} = +10 \text{ m}$	$H_{\max} = 252 \text{ m}$	$D_s = 3 \text{ m}$ $h_s = 1.8 \text{ m}$	$D_s = 5 \text{ m}$ $h_s = 1.8 \text{ m}$	$7.38 \text{ m}^3$	لاروک و همکاران (۱۹۹۹)
۳۸۰۱۹	$H_{\min} = +0.03 \text{ m}$	گزارش نشده	$D_s = 2.5 \text{ m}$ $h_s = 2.5 \text{ m}$	$D_s = 2 \text{ m}$ $h_s = 2 \text{ m}$	$14.94 \text{ m}^3$	چمنی و همکاران (۲۰۱۳)
۳۱۴۹۵	$H_{\min} = +10 \text{ m}$	$H_{\max} = 242 \text{ m}$	$D_s = 4.05 \text{ m}$ $h_s = 1.8 \text{ m}$ 3	$D_s = 4.6 \text{ m}$ $h_s = 1.0 \text{ m}$	$4.31 \text{ m}^3$	مدل پیشنهادی



شکل ۹. مقادیر بیشینه هد کل در طول سامانه مورد مطالعه



شکل ۱۰. مقادیر کمینه هد کل در طول سامانه مورد مطالعه



شکل ۱۱. میزان همبستگی مقادیر کمینه هد مشاهداتی در تحقیقات لاروک و همکاران (۱۹۹۹) و محاسبه شده توسط نرم افزار

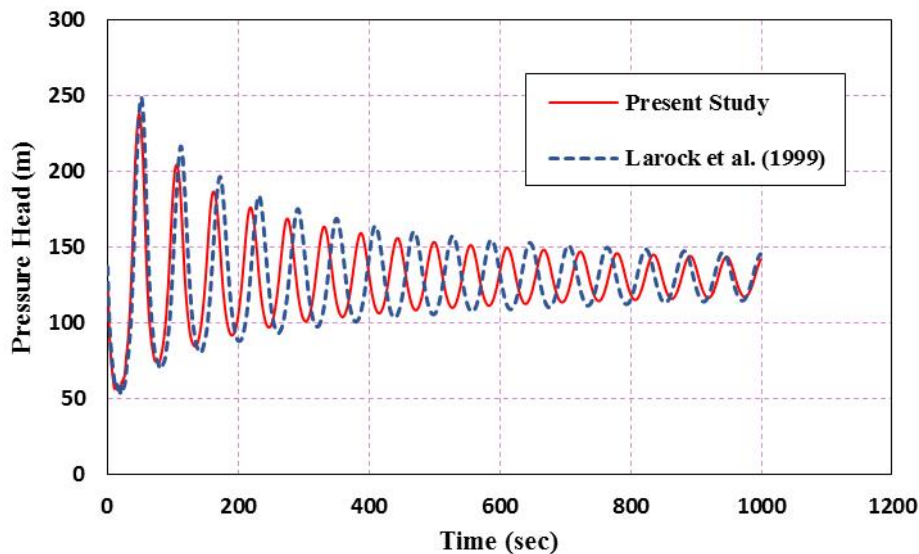
در خصوص مقادیر بیشینه هد کل نیز، شاخص RMSE (رابطه ۱۱) برابر ۵/۹۳ است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{O_i} - X_{e_i})^2} \quad (11)$$

که در این رابطه،  $X_o$  و  $X_e$  به ترتیب مقادیر بیشینه هد کل مشاهده شده در تحقیقات لاروک و محاسبه شده توسط نرم افزار هستند.

جریان غیرماندگار رخ داده در سامانه در اثر قطع پمپاژ، از

بر اساس شکل های فوق، مشاهده می شود که بیشینه و کمینه هد کل در سامانه، به ترتیب در محل ایستگاه پمپاژ (گره شماره ۱) و موقعیت مخزن ثانویه (گره شماره ۴) رخ می دهد. لذا این نقاط، نقاط بحرانی سامانه هستند که بیشتر مورد توجه قرار می گیرند. از سوی دیگر، دقت نتایج مدل شبیه ساز نرم افزار در مقایسه با نتایج لاروک و همکاران نیز مشهود است. میزان خطای نرم افزار، در پیش بینی مقادیر کمینه هد کل، بر اساس ضریب نکوئب برآزش ( $R^2$ ) و مطابق با شکل ۱۱، برابر با ۰/۹۹۴۱ است



شکل ۱۲. مقایسه نوسانات فشار در طی زمان در تحقیقات لاروک و همکاران (۱۹۹۹) و مطالعه حاضر

فشارهایی برابر یا کمتر از حداقل فشار را تجربه کنند، با خطر جدایش ستون سیال یا کویتاسیون مواجه می‌شوند که پیامد دیگری از جریان‌های غیرماندگار است. چمنی و همکاران (۲۰۱۳) حداقل فشار در این سامانه را ۱۰- متر در نظر گرفته‌اند [۲۶].

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که کمینه فشار در سامانه مربوط به ثانیه ۱۱/۹۶ و به مقدار ۹/۰۷- متر است که در آستانه خطر است با تجهیز سامانه مخازن ضربه‌گیر و محفظه هوا، این مقدار هم در مطالعات لاروک و همکاران و هم در مطالعات حاضر به عدد ۱۰+ متر می‌رسد.

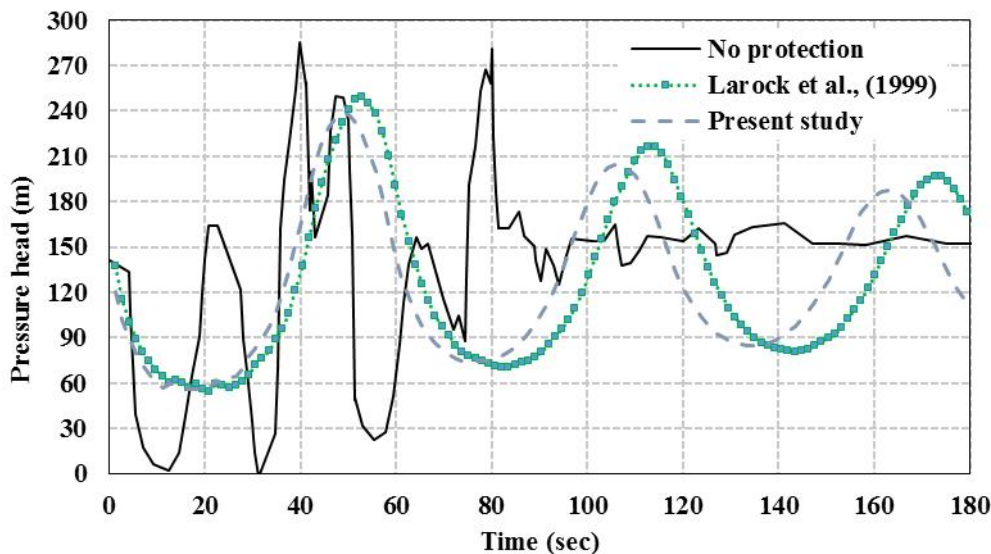
در خصوص نتایج مدل خود بر کاهش میزان امواج فشاری مثبت، گزارشی ارائه نکرده‌اند اما بیان کرده‌اند که محفظه هوا و مخازن ضربه‌گیر طراحی شده توسط الگوریتم ژنتیک فازی، توانسته فشار منفی در سامانه را به ۰/۰۳+ متر برساند. این مسئله، به همراه نتایج طراحی آنها و نتایج طراحی لاروک و همکاران (۱۹۹۹) و نیز نتایج طراحی مطالعه حاضر در جدول ۱ نشان داده شده است.

همان‌گونه که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، مقدار حجم محفظه هوا بر اساس مطالعات لاروک و همکاران (۱۹۹۹) برابر با

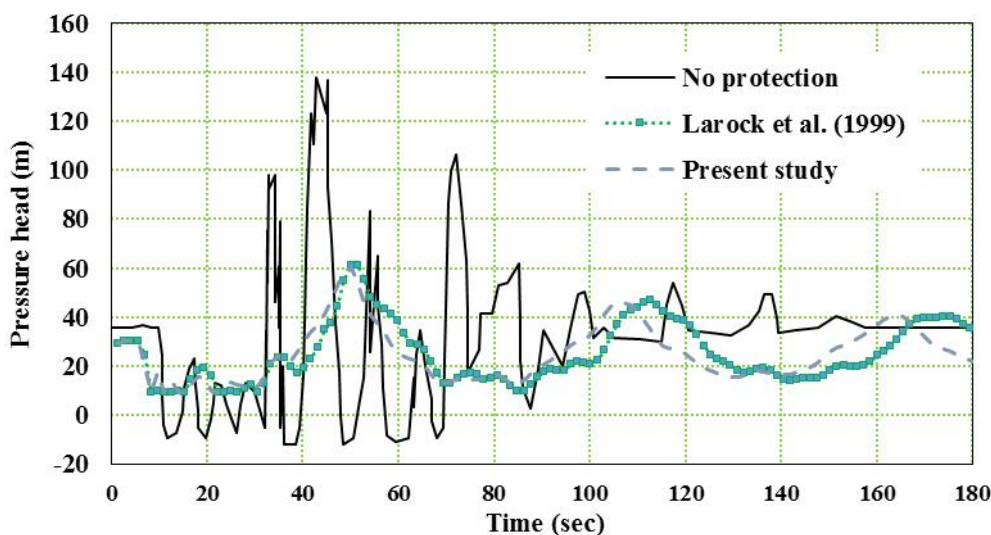
نوع میرا بوده و با گذر زمان مستهلک می‌شود. ولی در همان ثانیه‌های ابتدایی، این جریان می‌تواند برای سامانه خسارتی به بار آورد. شکل ۱۲، نوسانات امواج فشاری مثبت را در طی مدت زمان شبیه‌سازی (۱۰۰۰ ثانیه)، در گره بحرانی شماره ۱، نشان داده است. با توجه شکل مشاهده می‌شود که زمان شبیه‌سازی برای تحلیل رخداد ضربه قوچ کافی بوده و بیشترین دامنه تغییرات فشار در ۱۸۰ ثانیه آغازین صورت گرفته است.

تجهیز سامانه به مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا، نقش مؤثری در کاهش پیامدهای جریان غیرماندگار ایفا کرده است. این مسئله در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ قابل مشاهده است در این شکل‌ها، تغییرات فشار را در گره‌های بحرانی ۱ و ۴ در سه حالت: بدون تجهیزات حفاظتی، نتایج مطالعات لاروک و همکاران (۱۹۹۹) و بر اساس مدل پیشنهادی این مقاله، نشان می‌دهند. بر اساس شکل ۱۳، مشاهده می‌شود که بیشینه فشار در سامانه در ثانیه ۴۰ و به مقدار ۲۸۵ متر است که با تجهیز سامانه به ادوات مذکور، این مقدار در مطالعات لاروک و همکاران به ۲۵۲ و در مطالعات حاضر به ۲۴۲ متر کاهش می‌یابد.

حداقل فشار در سامانه‌های انتقال آب با توجه به فشار اتمسفر، دمای آب و فشار بخار تعیین می‌شود. سامانه‌هایی که



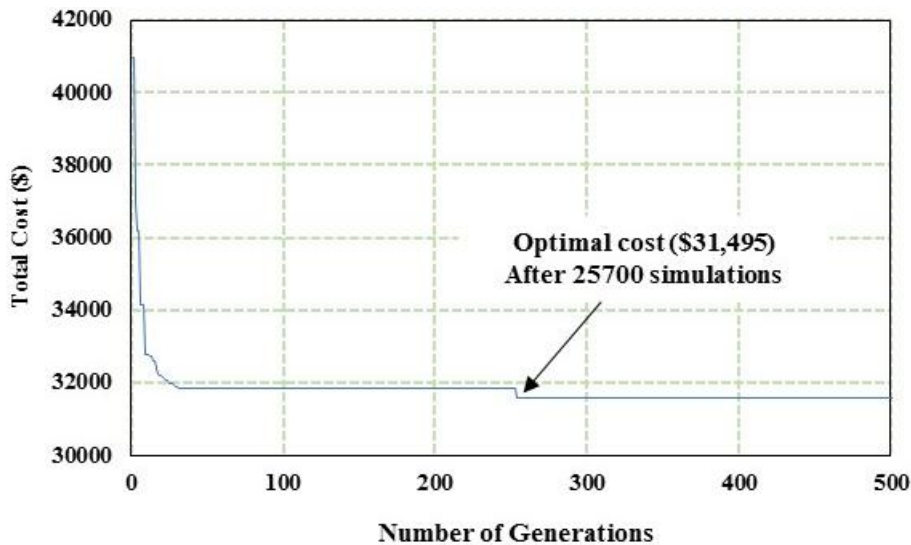
شکل ۱۳. تغییرات فشار در گره شماره ۱



شکل ۱۴. تغییرات فشار در گره شماره ۴

نسبت به مدل پیشنهادی کمتر است دلیل این مسئله آن است که هزینه واحد ساخت محفظه هوا نسبت به مخزن ضربه‌گیر به مراتب بیشتر در نظر گرفته شده است (حدود ۳ برابر)، و لذا نرم‌افزار ترجیح داده است با وجود استفاده از مخازن ضربه‌گیر بزرگ‌تر، حجم محفظه هوا را کاهش دهد. این امر سبب شده است که مجموع هزینه مورد نیاز برای ساخت تجهیزات حفاظتی نسبت به تحقیقات لاروک و همکاران (۱۹۹۹) در

۷/۳۸ مترمکعب و بر اساس مطالعات چمنی و همکاران (۲۰۱۳) برابر با ۱۴/۹۴ مترمکعب به دست آمده است. درحالی که مدل بهینه‌ساز، مقدار ۴/۳۱ متر مکعب را پیشنهاد داده است. همه روش‌های طراحی، احداث دو مخزن ضربه‌گیر را در موقعیت‌های مشابه (انتهای لوله ۱ و انتهای لوله ۳) پیشنهاد داده‌اند. با این حال، مجموع حجم مخازن ضربه‌گیر محاسبه شده با روش طراحی رایج و روش الگوریتم ژنتیک فازی،



شکل ۱۵. تاریخچه همگرایی برای یافتن نقطه بهینه طراحی در مدل پیشنهادی

تجهیزات با رویکرد کاهش هزینه و ارتقای سطح ایمنی، ضروری است. در این مقاله، نرم‌افزاری ارائه شد که قابلیت همزمان شبیه‌سازی جریان گذرا در سامانه‌های انتقال آب و بهینه‌سازی مخازن ضربه‌گیر و محفظه‌های هوا را دارد. کارایی این نرم‌افزار در دو جنبه شبیه‌سازی هیدرولیکی و بهینه‌سازی، در قالب یک مطالعه موردی با نتایج مطالعات لاروک و همکاران (۱۹۹۹) و چمنی و همکاران (۲۰۱۳) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج بخش شبیه‌ساز نرم‌افزار با مطالعه لاروک و همکاران، نشان داد که کمینه هد در سامانه دقیقاً برابر به‌دست آمده است و تنها در حدود ۴ درصد اختلاف در برآورد بیشینه هد سامانه وجود داشته است. همسانی نوسانات فشار در گره‌های بحرانی شبکه نیز (RMSE=5.93 و R<sup>2</sup>=0.99)، دلیلی دیگر بر صحت عملکرد مدل شبیه‌ساز بود. نتایج بخش بهینه‌سازی نیز نشان داد که مدل پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک فازی توانسته است که مجموع هزینه‌های مربوط به ساخت مخازن ضربه‌گیر و محفظه هوا را به میزان ۱۷ درصد کاهش دهد. ضمن آنکه مقادیر فشار اکسترمم در سامانه نیز در محدوده مجاز از پیش تعریف شده توسط کاربر باقی مانده است. به‌عبارت دیگر، کاهش هزینه، خللی در ایمنی سامانه ایجاد نکرده است. لذا بر اساس نتایج این

حدود ۲۵ درصد و نسبت به تحقیقات چمنی و همکاران (۲۰۱۳) در حدود ۱۷ درصد کاهش یابد. این در حالی است که مقادیر بیشینه و کمینه فشار در گره‌های سامانه، در محدوده مجاز تعریف شده توسط کاربر، باقی مانده است و بدین ترتیب تجهیزات به کار گرفته شده، توانسته ضمن رفع خطر کاویتاسیون، ضربه قوچ را نیز به میزان ۱۵ درصد کاهش دهد. لازم به ذکر است که مشخصات مربوط به نازل‌ها، در روش‌های طراحی، یکسان به‌دست آمده‌اند.

شکل ۱۵ تاریخچه همگرایی مدل بهینه‌ساز را تا رسیدن به پاسخ بهینه نشان می‌دهد. بر این اساس، مدل پیشنهادی پس از ۲۵۷ نسل یا به‌عبارتی پس از ۲۵۷۰۰ بار تحلیل سامانه در شرایط جریان گذرا، توانسته است به نقطه بهینه نزدیک شود و پس از آن، در مقادیر به‌دست آمده برای تابع هدف تغییری مشاهده نشده است.

### نتیجه‌گیری

ضربه قوچ و کاویتاسیون ایجاد شده در سامانه‌های انتقال آب، می‌تواند به شکل مؤثری توسط محفظه‌های هوا و مخازن ضربه‌گیر کنترل شود. اما به توجه گران بودن این تجهیزات و نیز اهمیت حفظ سامانه در برابر نوسانات جریان، بهینه‌سازی این

صرفه‌جویی اقتصادی قابل ملاحظه‌ای در طرح‌های انتقال آب در کشور شود. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، نسبت به افزایش قابلیت‌های این نرم‌افزار، از جمله قابلیت بهینه‌یابی مسیر پروژه‌های انتقال آب، اقدام شود.

تحقیق، نرم‌افزار توسعه شده، از توانمندی مناسبی برای شبیه‌سازی هیدرولیکی سامانه‌های انتقال آب و بهینه‌سازی ابعاد، تعداد و موقعیت قرارگیری محفظه‌های هوا و مخازن ضربه‌گیر برخوردار است. قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌تواند سبب

### منابع مورد استفاده

1. Afshar, H., R. Kerachian, M. Bazargan-Lari and A. Niktash. 2008. Developing a closing rule curve for valves in pipelines to control the water hammer impacts: Application of the NSGA-II optimization model. *Pipelines 2008: Pipeline Asset Management: Maximizing Performance of our Pipeline Infrastructure*. 1-10.
2. Afshar, M. and J. Mahjoobi. 2008. Optimal design of pumped pipeline systems using genetic algorithm and mathematical optimization. *Journal of Water & Wastewater* 35-48.
3. Bostan, M., M. Afshar, M. Khadem and A. Akhtari. 2016. A hybrid MILP-LP-LP approach for the optimal design and operation of unconfined groundwater utilization systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 65(3): 208-219.
4. Bostan, M., M. H. Afshar and M. Khadem. 2015. Extension of the hybrid linear programming method to optimize simultaneously the design and operation of groundwater utilization systems. *Engineering Optimization* 47(4): 550-560.
5. Boulos, P. F., B. W. Karney, D. J. Wood and S. Lingireddy. 2005. Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. *Journal of the American Water Works Association* 97(5): 111-124.
6. Cao, H., C. Zheng, F. Luo and L. Guo. 2013. The effect of surge tanks in the process of the protection towards water hammer fluctuation in long-distance pipelines. *ICPTT 2013: Trenchless Technology* 249-261.
7. Chamani, M., S. Pourshahabi and F. Sheikholeslam. 2013. Fuzzy genetic algorithm approach for optimization of surge tanks. *Scientia Iranica* 20(2): 278-285.
8. Chaudhry, M. H. 1979. *Applied Hydraulic Transients*, Springer.
9. Choon, T. W., L. K. Aik, L. E. Aik and T. T. Hin. 2012. Investigation of water hammer effect through pipeline system. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology* 2(3): 246-251.
10. De Martino, G. and N. Fontana. 2012. Simplified approach for the optimal sizing of throttled air chambers. *Journal of Hydraulic Engineering* 138(12): 1101-1109.
11. Dijk, M. v., S. v. Vuuren and J. v. Zyl. 2008. Optimising water distribution systems using a weighted penalty in a genetic algorithm. *Water SA* 34(5): 537-548.
12. Duan, H. -F., Y. -K. Tung and M. S. Ghidaoui. 2010. Probabilistic analysis of transient design for water supply systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(6): 678-687.
13. Geem, Z. W. 2009. Harmony search optimisation to the pump-included water distribution network design. *Civil Engineering and Environmental System* 26(3): 211-221.
14. Geem, Z. W. 2015. Multiobjective optimization of water distribution networks using fuzzy theory and harmony search. *Water Resources Research* 7: 3613-3625.
15. Gupta, I., A. Gupta and P. Khanna. 1999. Genetic algorithm for optimization of water distribution systems. *Environmental Modeling & Software* 14: 437-446.
16. Huo, J. 2011. Surge protections for a major raw water pump and pipeline system. *World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability*.
17. Huo, J. 2013. Surge analysis and engineering design for a somerset pump station and its water distribution system. *World Environmental and Water Resources Congress 2013: Showcasing the Future*.
18. Izquierdo, J., P. A. Lopez, G. Lopez, F. J. Martinez and R. Perez. 2006. Encapsulation of air vessel design in a neural network. *Applied Mathematical Modelling* 30: 395-405.
19. Jamal, A., M. Najarchi and A. Asadiany Yekta. 2016. Designing hydraulic air chamber in water transmission systems using genetic algorithm. *Advances in Science and Technology Research Journal* 10(31): 2299-8624.
20. Jazayeri Moghaddas, S. M., H. M. V. Samani and A. Haghghi. 2017. Multi-objective optimization of transient protection for pipelines with regard to cost and serviceability. *Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua* 66(5): 340-352.
21. Jung, B. S. and B. W. Karney. 2004. Fluid transient and pipeline optimization using GA and PSO: the diameter connection. *Urban Water Journal* 1(2): 167-176.

22. Jung, B. S. and B. W. Karney. 2006. Hydraulic optimization of transient protection devices using GA and PSO approaches. *Journal of Water Resources Planning and Management* 132(1): 44-52.
23. Kim, S. H. 2010. Design of surge tank for water supply systems using the impulse response method with the GA algorithm. *Journal of Mechanical Science and Technology* 24(2): 629-636.
24. Kwon, H. J. 2007. Analysis of transient flow in a piping system. *KSCE Journal of Civil Engineering* 11(4): 209-214.
25. Kwon, H. J. 2007. Computer simulations of transient flow in a real city water distribution system. *KSCE Journal of Civil Engineering* 11(1): 43-49.
26. Larock, B. E., R. W. Jeppson and G. Z. Watters. 1999. *Hydraulics of Pipeline Systems*, CRC Press.
27. Neuhaus, T., A. Dudlik and A. S. Tijsseling. 2005. Experiments and corresponding calculations on thermohydraulic pressure surges in pipes. External Research Report, Technische Universiteit Eindhoven.
28. Nicolini, M. and L. Zovatto. 2009. Optimal location and control of pressure reducing valves in water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 135: 178-187.
29. Paola, F. D., E. Galdiero and M. Giugni. 2015. A jazz-based approach for optimal setting of pressure reducing valves in water distribution networks. *Engineering Optimization* 48(5): 727-739.
30. Ramalingam, D. and S. Lingireddy. 2013. Neural network-derived heuristic framework for sizing surge vessels. *Journal of Water Resources Planning and Management* 140(5): 678-692.
31. Simpson, A. R., G. C. Dandy and L. J. Murphy. 1994. Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management* 120: 423-443.
32. Skulovich, O., R. Bent, D. Judi, L. S. Perelman and A. Ostfeld. 2015. Piecewise mixed integer programming for optimal sizing of surge control devices in water distribution systems. *Water Resources Research* 51(6): 4391-4408.
33. Skulovich, O., L. Perelman and A. Ostfeld. 2014. Bi-level optimization of closed surge tanks placement and sizing in water distribution system subjected to transient events. *Procedia Engineering* 89(132): 1335-1339.
34. Skulovich, O., L. Perelman and A. Ostfeld. 2014. Optimization of surge protection devices in water distribution systems. World Environmental and Water Resources Congress.
35. Skulovich, O., L. S. Perelman and A. Ostfeld. 2016. Optimal closure of system actuators for transient control: an analytical approach. *Journal of Hydroinformatics* 18(3): 393-408.
36. Stephenson, D. 2002. Simple guide for design of air vessels for water hammer protection of pumping lines. *Journal of Hydraulic Engineering* 128(8): 792-797.
37. Sun, Q., Y. b. Wu, Y. Xu. and T. U. Jang. 2016. Optimal sizing of an air vessel in a long-distance water-supply pumping system using the SQP method. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 7(3): 05016001.
38. Suribabu, C. R. and T. R. Neelakantan. 2006. Design of water distribution networks using particle swarm optimization. *Urban Water Journal* 3(2): 111-120.
39. Tang, Y. and M. Samad. 2012. Optimal design of air valves in cooling water systems. in World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries.
40. Wan, W., W. Huang and C. Li. 2014. Sensitivity analysis for the resistance on the performance of a pressure vessel for water hammer protection. *Journal of Pressure Vessel Technology* 136(1): 011303.
41. Wylie, E. B. 1984. Fundamental equations of waterhammer. *Journal of Hydraulic Engineering* 110(4): 539-542.
42. Wylie, E. B., V. L. Streeter and L. Suo. 1993. *Fluid Transients in Systems*. Vol. 1. Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.

## Development of a Practical Model for Optimizing Surge Tanks and Air Chambers in Water Transmission Systems

A. Jamal<sup>1\*</sup>, M. Najarchi<sup>1</sup> and M. M. Najafi Zadeh<sup>2</sup>

(Received: May 18-2019; Accepted: December 30-2019)

### Abstract

Surge tanks and air chambers are the most useful solution to deal with water hammer in water transmission systems (WTS). The optimal design of these protective devices can be effective in reducing the costs of constructing and operating a water transmission system. In this article, some software with the capability of simulating and optimizing these protective equipment is presented. To simulate the behavior of the system in the transient condition, the characteristic method was used. To optimize the number, dimensions and location of the surge tanks and air chambers, the genetic algorithm was employed. Constraints of the problem included the control of negative and positive pressures within the permissible range to prevent the cavitation and water hammer. To test the performance of simulation and optimization models, a well-known water transmission system in the previous research was selected as a case study. The results indicated that the critical heads were damped to a safer and allowable range; also, the total cost of the surge tanks and air chambers was reduced by 17% by the proposed method.

**Keywords:** Water hammer, Cavitation, Surge tank, Air chamber.

---

1. Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

2. Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran.

\*: Corresponding author, Email: a.jamal91@iau-arak.ac.ir