

## کالیبره‌سازی مدل تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن انواع متغیرهای تنظیم و شرایط مصرف

مسعود تابش<sup>۱\*</sup>، مهدی جاماسب<sup>۲</sup>، رامتین معینی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساختها، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

\* تهران، صندوق پستی ۱۱۱۵۵/۴۵۶۳

mtabesh@ut.ac.ir

**چکیده-** در سالهای اخیر، استفاده از مدل‌های کامپیوتری به منظور شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در شبکه‌های توزیع آب گسترش قابل توجهی یافته است. این شبکه‌ها نقش مؤثری را در ارزیابی و مدیریت آب شهری و تصمیمات مرتبط با مدیریت و بهره‌برداری بهینه سیستم ایفا می‌کنند. اما به‌منظور اصلاح عملکرد مدل و کاهش اثر عدم قطعیت اطلاعات ورودی بر آن برای شرایط مختلف مصرف در شبکه، کالیبره‌سازی ضروری است. برخی از نرم‌افزارهای موجود توانایی کالیبره‌سازی را دارند، اما دستیابی به آنها مستلزم هزینه زیادی است. از طرف دیگر، مدل قابل دسترس EPANET که استفاده و اعتبار زیادی در زمینه تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آب دارد، قابلیت کالیبره‌سازی را ندارد. در این تحقیق، با معرفی نوعی مسأله بهینه‌سازی برای کالیبره‌سازی مدل EPANET، نوعی مدل الگوریتم ژنتیک تهیه و با مدل مذکور ادغام شده است. در این فرایند، زبری لوله‌های شبکه (ضرایب هیزن- ویلیامز)، مصارف گرهی و قطر لوله‌ها به‌عنوان متغیرهای تصمیم مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. همچنین برای ارزیابی روش ارائه شده، شبکه نمونه در شرایط مختلف مصرف، تحلیل شده و نتایج به‌دست آمده مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب متغیرهای مصارف گرهی و زبری لوله‌ها، نتایج دقیقتری را حاصل می‌کند. همچنین نتایج حاصل از شرایط مصرف آتش‌نشانی و مصرف حداکثر، بسیار دقیقتر از نتایج شرایط مصرف نرمال یا مصرف حداقل است.

**کلید واژگان:** کالیبره‌سازی، مدل تحلیل هیدرولیکی، شبکه‌های توزیع آب، EPANET، الگوریتم ژنتیک.

۱- مقدمه  
است. از طرف دیگر با توجه به پیشرفت علوم کامپیوتری، این امکان فراهم شده که بسیاری از مسائل پیچیده را شبیه‌سازی کرد. در واقع در دنیای امروز مدل‌ها نقش

با توجه به منابع محدود و گسترش روز افزون نیاز بشر به آب، مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه منابع، اجتناب‌ناپذیر

(Kapelan et al., 2003). روش تحلیلی بر آزمون و خطا مبتنی است که توسط (Walski, 1983; Bhawe, 1988) استفاده شده است. (Shamir & Howard, 1968) یکی از پیشگامان استفاده از روشهای صریح بوده‌اند و ثابت کردند که چگونه می‌توان معادلات شبکه را برای تحلیل هیدرولیکی بر حسب بلندا یا مصرف گره بیان کرد. این نوع روش سپس توسط (Ormsbee & Wood, 1986; Boulos & Wood, 1990, 1991) و Ferreri et al. (1994) برای کالیبره‌سازی مدل‌ها استفاده شده است. روش سوم بر طرفدارترین و به بیانی موثرترین روش ممکن برای کالیبره‌سازی است که توسط افراد مختلف و با تعریف تابع‌های هدف گوناگون استفاده شده است

(Ormsbee, 1989; Lansey & Basnet, 1991; Borzi et al., 2005; Colombo & Giustolisi, 2007; Behzadian et al., 2007; Savic & Walters, 1995)

پارامترهای مختلفی محاسبات مدل تحلیل هیدرولیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهند و لذا می‌توان آنها را به‌عنوان مجهولات در مسأله بهینه‌سازی کالیبره‌سازی شبکه منظور کرد. از جمله می‌توان به ضرایب زبری و قطر لوله‌ها و مصارف تخصیص داده شده به گره‌ها اشاره کرد (Ormsbee, 1989).

یکی از مدل‌های تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب، مدل EPANET است. مدل مذکور به سبب دقت محاسباتی، از اعتبار زیادی در زمینه تحلیل سیستم‌های آبرسانی برخوردار است و به دلیل قابلیت دسترسی همگانی، امروز به‌طور گسترده‌ای در تحلیل شبکه‌های توزیع آب استفاده می‌شود. این مدل اگر چه توانایی انجام کالیبره‌سازی را ندارد اما قابلیت‌های متعددی، از جمله: عدم محدودیت اندازه شبکه، محاسبه افت اصطکاکی با استفاده از روابط مختلف، مدل‌سازی انواع مختلف شیرآلات و

مؤثری را در تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی و مدیریت پروژه‌ها ایفا می‌کنند. سیستم‌های توزیع آب نیز از این قاعده مستثنی نبوده و اهداف زیادی با استفاده از شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان و شرایط حاکم بر شبکه مورد نظر دنبال می‌شود. به این ترتیب، استفاده دقیق از مدل‌ها در طراحی، تحلیل و مدیریت بهینه شبکه‌های توزیع و انتقال آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. معمولاً عوامل متعددی باعث به‌وجود آمدن اختلاف بین واقعیت و نتایج شبیه‌سازی می‌شود، که از این میان به موارد زیر می‌توان اشاره کرد (ECAC, 1999): ۱- خطای طراحی؛ ۲- خطای انسانی در اندازه‌گیریها و استفاده از ابزار؛ ۳- خطای ابزار اندازه‌گیری؛ ۴- خطای ساده‌سازی طرح؛ ۵- خطای ناشی از مدل‌سازی ناصحیح هندسه شبکه؛ ۶- خطا در تعیین شرایط مرزی.

این تفاوتها سبب میشود که نتوان مدل را با اطمینان به کار برد. از این رو برای اصلاح عملکرد مدل و برطرف (یا حداقل) کردن اثر خطاها در شرایط مختلف مصرف، کالیبره‌سازی مدل ضروری است. کالیبره‌سازی در تعریفی ساده عبارت است از روند مقایسه نتایج مدل با مشاهدات میدانی و در صورت نیاز، تنظیم داده‌ها و اطلاعات اولیه تحلیل شبکه تا جایی که بین پیش‌بینی‌ها و مقادیر اندازه‌گیری شده در شرایط مختلف مصرف هماهنگی به‌وجود آید (Shamir & Howard, 1977; Ormsbee & Lingireddy, 1997; Walski, 1983)

روشهای مختلفی برای کالیبره‌سازی مدل‌های تحلیل هیدرولیکی توسط محققان به‌کار برده شده است. با مرور تحقیقات در این زمینه، روشهای انجام کالیبره‌سازی را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: ۱- روشهای تحلیلی (آزمون و خطا)؛ ۲- روشهای صریح<sup>۱</sup>؛ ۳- روشهای غیرصریح<sup>۲</sup> (ضمنی)

انتخاب شود که دو هدف را ارضا کنند (Kapelan et al., 2003): اول عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مدل‌سازی برای شرایط مختلف در شبکه به حداقل برسد و دوم، تا حد امکان هزینه‌های داده‌برداری کم شود. همچنین از آنجا که برخی از پارامترهای توصیف‌کننده سیستم آبرسانی مانند مصارف، به زمان وابسته‌اند، بنابراین باید بین اندازه‌گیری‌های میدانی صورت گرفته و شرایط شبیه‌سازی از نظر زمانی هماهنگی وجود داشته باشد، تا دقت نتایج کالیبره‌سازی بهبود یابد.

### ۳- پارامترهای تنظیمی در کالیبره‌سازی

در این تحقیق، با توجه به مطالعات قبلی در این زمینه، چهار حالت برای پارامترهای تنظیمی در نظر گرفته شد: ۱- تنظیم ضریب زبری لوله‌ها ۲- تنظیم مصارف گرهی ۳- تنظیم همزمان زبری لوله‌ها و مصارف گرهی ۴- تنظیم قطر لوله‌ها. موارد اول و دوم به‌طور وسیعی در تحقیقات مختلف به‌عنوان پارامتر تنظیمی استفاده شده است، اما برای به حداقل رساندن خطاهای پیش‌بینی، کالیبره‌سازی مدل با تنظیم همزمان بیش از یک پارامتر توصیه شده است (Walski, 2000).

### ۴- استفاده از بهینه‌سازی در کالیبره‌سازی

در این روش، روند کالیبره‌سازی مدل تحلیل شبکه به‌صورت بهینه‌سازی یک تابع هدف با قیودی مطرح می‌شود که حل آن به تعیین پارامترهای مجهول منجر خواهد شد. محققان مختلف، توابع هدف متفاوتی را برای بهینه‌سازی شبکه‌های آب از جمله برای کالیبره‌سازی ارائه کرده‌اند.

(Vassiljev et al., 2005; Borzi et al., 2005; Greco & Del Giudice, 1999) در این مقاله رابطه (۱) به‌عنوان تابع هدف مسأله بهینه‌سازی مورد نظر معرفی می‌شود (Haestad Methods, 2005; Borzi et al., 2005).

پمپها، امکان در نظر گرفتن الگوهای مختلف مصرف و تحلیل دینامیکی و کیفی سیستم را دارد (Rossman, 2000). از طرف دیگر، استفاده از سایر مدل‌های تجاری موجود، مستلزم هزینه زیاد و پشتیبانی فنی است.

در این تحقیق، برنامه‌ای کامپیوتری به‌منظور کالیبره‌سازی مدل تحلیل شبکه EPANET تهیه شده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، برای بهینه‌سازی تابع هدف تعریف شده، مدل EPANET با مدل بهینه‌سازی ادغام شده است. با ایجاد ارتباط بین مدل هیدرولیکی و مدل بهینه‌سازی و استفاده از زبری لوله‌ها، مصارف گرهی یا قطر لوله‌ها، به‌عنوان متغیرهای تنظیمی مسأله که مقادیر آنها در طی فرایند بهینه‌سازی مشخص می‌شود، روند کالیبره‌سازی تا دستیابی به هماهنگی قابل قبولی میان نتایج شبیه‌سازی شبکه و اندازه‌گیری میدانی ادامه می‌یابد. برای کالیبره‌سازی مدل، چهار نوع شرایط مصرف: حداقل، نرمال، حداکثر و آتش‌نشانی منظور شده است. در پایان نتایج حاصل نقد و بررسی شده است.

### ۲- مشاهدات میدانی در کالیبره‌سازی و

#### داده‌های مورد نیاز مدل‌سازی

منظور از مشاهدات، برداشت اطلاعات و تهیه سیستم فیزیکی از شبکه است، به نحوی که مدل بتواند آن را تحلیل کند (Ormsbee & Lingireddy, 1997). جمع‌آوری اطلاعات مربوط به طول، قطر و ضریب زبری لوله‌ها، بلندا و میزان مصرف گرهی در ارتباط با همین قضیه می‌باشد. معمولاً با اندازه‌گیری بلندا یا فشار در گره‌ها و جریان در لوله‌ها می‌توان دقت پیش‌بینی‌ها و به دنبال آن میزان کالیبره بودن مدل را بررسی کرد. سایر اندازه‌گیری‌ها مانند سطح آب در تانکها، مخازن و وضعیت شیرها به‌عنوان شرایط مرزی منظور می‌شوند. در مورد محل جمع‌آوری داده‌ها توصیه می‌شود که مکانهایی

رنگ شدن نقش کامپیوترها در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده و با تعداد متغیرهای تصمیم زیاد، روش‌های جدیدی پیشنهاد شده است. الگوریتم ژنتیک، یکی از این روشها است که به سبب توانمندی آن، در کالیبره‌سازی سیستمهای واقعی به‌کار می‌رود. (Haestad Method, 2005; Borzi et al., 2005)

الگوریتم ژنتیک روشی آماری برای بهینه‌یابی و جستجو است، که فکر اصلی آن از نظریه تکامل الهام گرفته شده و کارکرد آن بر توارث طبیعی استوار است. در بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک، مجموعه‌ای از جوابها - که هر کدام به‌عنوان یک کروموزوم شناخته می‌شوند و شامل مجموعه‌ای از متغیرهای مسأله (ژن) هستند- در نظر گرفته شده و با تغییراتی که در روند بهینه‌سازی اتفاق می‌افتد، مقدار بهینه هر متغیر تصمیم تعیین می‌شود. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود. پارامترهای مختلفی در به‌کارگیری این الگوریتم تعریف می‌شود که به‌دلیل ارائه و توضیح آنها در مقالات متعدد از توضیح آنها در این مقاله خودداری شده است.

#### ۶- روند کالیبره‌سازی مدل EPANET

مدل تحلیل هیدرولیکی EPANET با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C و در چند بخش تهیه و تدوین شده است. اما به‌دلیل حجم گسترده برنامه مدل EPANET و پیچیدگی ناشی از هماهنگ‌سازی قسمتهای مختلف آن با مدل بهینه‌سازی، با استفاده از محیط برنامه‌نویسی MATLAB7 کل نرم‌افزار مذکور به‌صورت مرجعی از فرامین و اطلاعات تبدیل شده و با فراخوانی دستورهای لازم، شبکه مورد نظر تحلیل هیدرولیکی می‌شود (جاماسب، ۱۳۸۵).

با توجه به این که در بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک، در هر نسل مقادیر متغیرهای تصمیم مسأله تنظیم

$$\text{Min } f(x) = \sum_{i=1}^N W_n \left( \frac{H_{\text{calc}} - H_{\text{meas}}}{H_{\text{meas}}} \right)^2 \quad (1)$$

$+ \sum_{i=1}^S W_s \left( \frac{Q_{\text{calc}} - Q_{\text{meas}}}{Q_{\text{meas}}} \right)^2$

$N$  تعداد نقاط دارای فشار سنج و  $S$  تعداد لوله‌هایی است که جریان سنج دارند. همچنین  $H_{\text{calc}}$  و  $Q_{\text{calc}}$ ، به‌ترتیب بلندای محاسبه شده گرهی و جریان محاسبه شده در لوله و  $H_{\text{meas}}$  و  $Q_{\text{meas}}$  به‌ترتیب بلندا و جریان اندازه‌گیری شده است.  $W_n$  و  $W_s$  ضرایب وزندهی است که می‌توان آنها را مانند رابطه (۲) براساس افتها و جریان در لوله‌ها تعیین کرد:

$$W_n = \left[ \frac{(H_{\text{loss}})_n}{\sum (H_{\text{loss}})_n} \right] \quad (2)$$

$$W_s = \left[ \frac{(Q_{\text{meas}})_s}{\sum (Q_{\text{meas}})_s} \right]$$

$(H_{\text{loss}})_n$  افت فشار در مسیر تا محل قرارگیری فشارسنج مورد نظر  $(n)$  و  $(Q_{\text{meas}})_s$  جریان در لوله  $S$  است که به‌ترتیب بر مجموع تمام افتها و جریانهای اندازه‌گیری شده، تقسیم می‌شوند.

قیدهای مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده عبارت است از:

۱- محدودیتهای هیدرولیکی سیستم، که برنامه‌ریزی مدل‌های تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب بر مبنای ارضای معادلات اساسی حاکم بر شبکه استوار است؛ ۲- محدودیتهای مرزی صریح که حدود متغیرهای تصمیم را معلوم می‌کند. به‌بیان دیگر، قیدهای مسأله مورد نظر شامل پارامترهای هیدرولیکی و محدودیتهای متغیرهای تصمیم است.

#### ۵- ابزار بهینه‌سازی

تاکنون از روشهای متنوعی به‌منظور حل مسائل بهینه‌سازی استفاده شده است. انتخاب روش مناسب علاوه بر ابعاد مسأله، به تعداد قیدها و متغیرهای تصمیم، شکل تابع هدف و معادلات تعریف شده برای قیدها بستگی دارد. امروز در ادامه روشهای بهینه‌سازی کلاسیک، همراه با پر

مذکور به صفر نزدیکتر باشد، بیانگر دقت مناسب تر نتایج است:

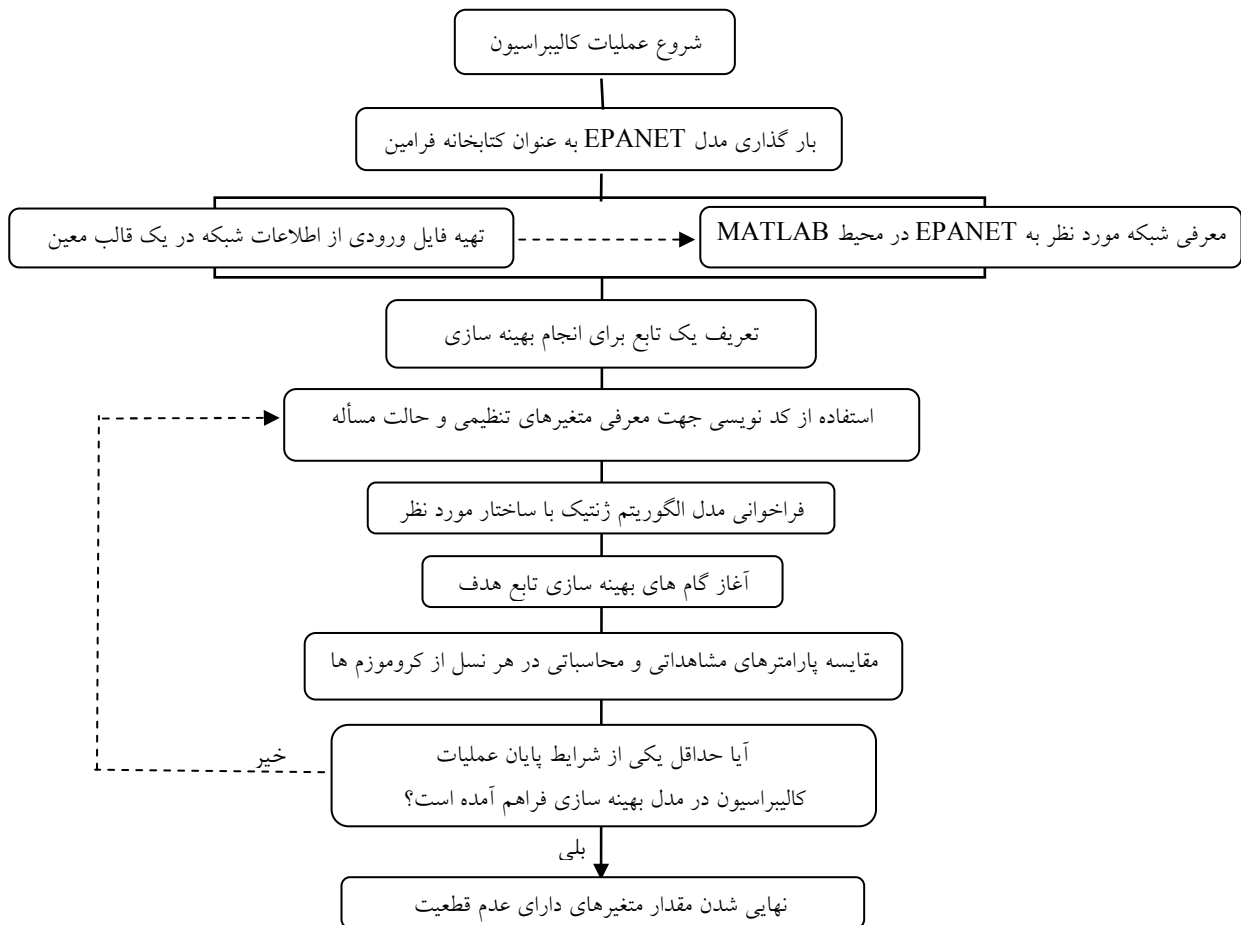
$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Actual_i - Forecast_i|}{Actual_i} \times 100 \quad (3)$$

$n$  تعداد داده‌ها و  $Actual_i$  و  $Forecast_i$  به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده پارامتر مورد نظر (مانند فشار و جریان) در نقطه  $i$  است.

و اصلاح می‌شوند، از این رو باید تحلیل شبکه به‌ازای تمامی رشته‌های جواب هر جمعیت انجام شده و تابع هدف به‌ازای آنها محاسبه شود. شکل ۱ مراحل کالیبره‌ساز مدل EPANET را نشان می‌دهد.

## ۷- شاخص ارزیابی نتایج

به‌منظور بررسی و ارزیابی نتایج، از معیار میانگین درصد خطای مطلق<sup>۱</sup>، استفاده می‌شود (رابطه ۳). هر چه شاخص

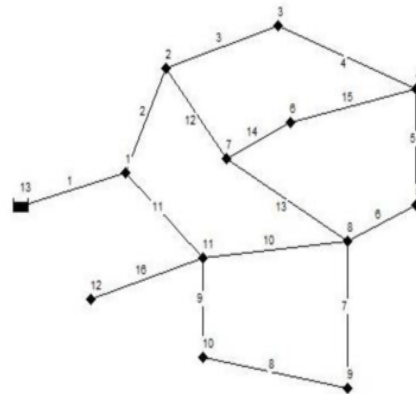


شکل ۱ راحل پیشنهادی کالیبراسیون مدل EPANET به صورت شماتیک (جاماسب، ۱۳۸۵)

1. Mean Absolute Percentage Error

### ۸- مطالعه موردی

به منظور ارزیابی روند پیشنهاد شده برای کالیبراسازی مدل تحلیل هیدرولیکی EPANET و با بررسی مقالات، شبکه شکل ۲ انتخاب شد (Lansey et al., 2001). اطلاعات و مشخصات ورودی مربوط به لوله‌ها و گره‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. در مطالعه میدانی برای شبکه، برای چهار شرایط مختلف مصرف، یعنی مصرف عادی (متوسط)، حداکثر، حداقل و جریان آتش نشانی، مقدار فشار در گره‌های ۲، ۵، ۹ و ۱۱ اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲ شبکه مطالعه شده

جدول ۱ اطلاعات لوله‌های شبکه

شماره لوله	طول (متر)	قطر (میلی‌متر)	C <sub>HW</sub>
۱	۳۰۴۸	۶۱۰	۱۱۰
۲	۱۵۲۴	۴۵۷	۱۱۰
۳	۱۵۲۴	۴۰۶	۱۰۰
۴	۱۶۷۶/۴	۳۵۶	۱۰۰
۵	۱۰۶۶/۸	۳۰۵	۱۲۰
۶	۱۶۷۶/۴	۳۵۶	۱۲۰
۷	۱۳۷۱/۶	۳۰۵	۹۰
۸	۷۶۲	۱۵۲	۹۰
۹	۱۰۶۶/۸	۳۰۵	۹۰
۱۰	۶۷۰/۶	۳۸۱	۹۰
۱۱	۱۹۸۱/۲	۴۵۷	۱۱۰
۱۲	۱۵۲۴	۳۵۶	۱۰۰
۱۳	۱۶۷۶/۴	۳۰۵	۱۲۰
۱۴	۹۱۴/۴	۳۵۶	۱۰۰
۱۵	۱۲۱۹/۲	۳۰۵	۱۰۰
۱۶	۱۲۱۹/۲	۴۰۶	۹۰

جدول ۲ اطلاعات مربوط به گره‌ها و اندازه‌گیری‌های فشار در شبکه

شماره گره	ارتفاع گره (متر)	مصرف نرمال (لیتر در ثانیه)	فشار اندازه‌گیری شده (برحسب متر) در شرایط مختلف مصرف شبکه		
			نرمال	حداکثر	حداقل
۲	۴۵/۷	۰	۵۸/۳	۵۰/۷	۶۳/۷
	۴۸/۷	۴۴			
	۵۰/۳	۴۱			
۵	۴۸/۷	۳۷	۵۹/۴	۴۷	۶۶
	۴۵/۷	۳۱			
	۴۷/۲	۲۴			
۹	۴۴/۲	۲۴	۶۵/۵	۵۶/۲	۷۲
	۴۲/۷	۰			
	۳۹/۶	۲۷			
۱۱	۴۱/۱	۲۲	۶۳/۴	۵۶/۲	۶۸/۴
	۴۴/۲	۰			
	۳۹/۶	۱۷			

بلندای آب در مخزن (گره ۱۳) برابر با ۱۱۵/۸ متر است.

و مصارف گرهی شبکه به‌عنوان متغیرهای تنظیمی و تصمیم مسأله پیشنهاد می‌شود. در ادامه با هدف ارزیابی کیفیت روند مذکور، شبکه نمونه‌ای در شرایط مختلف مدل‌سازی شده و با نتایج حاصل از کالیبره‌سازی در شرایط پایه اعمال جریان آتش‌نشانی (که حداقل خطا را در مدل‌سازی شرایط مختلف داشت) مقایسه می‌شود. محاسبات انجام شده در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳ نتایج کالیبراسیون با انتخاب همزمان دو متغیر

ضرایب زبری و مصارف گرهی

شرایط پایه مصرف	متوسط مقادیر خطا (%)
عادی	۱/۸۷۷
حداکثر	۱/۴۱۱
حداقل	۲۰/۲۳۷
جریان آتش‌نشانی	۱/۱۱۳

جدول ۴ مقایسه خطای شبیه‌سازی با استفاده از اطلاعات پایه

قبل از کالیبره‌سازی و نتایج حاصل از کالیبره‌سازی

شرایط پایه مصرف		MAPE (%)	
اطلاعات پایه شبکه	نتایج کالیبره‌سازی	اطلاعات پایه شبکه	نتایج کالیبره‌سازی
عادی	۰/۰۴۹	۱/۰۲۵	۰/۶۶۱
حداکثر	۱/۷۵۳	۲/۷۶۷	۰
حداقل	۲/۹۱۲	۲/۲۴۲	۱/۱۱۳
جریان آتش‌نشانی	۲/۲۴۲	۱/۷۳	
متوسط خطا	۱/۷۳		

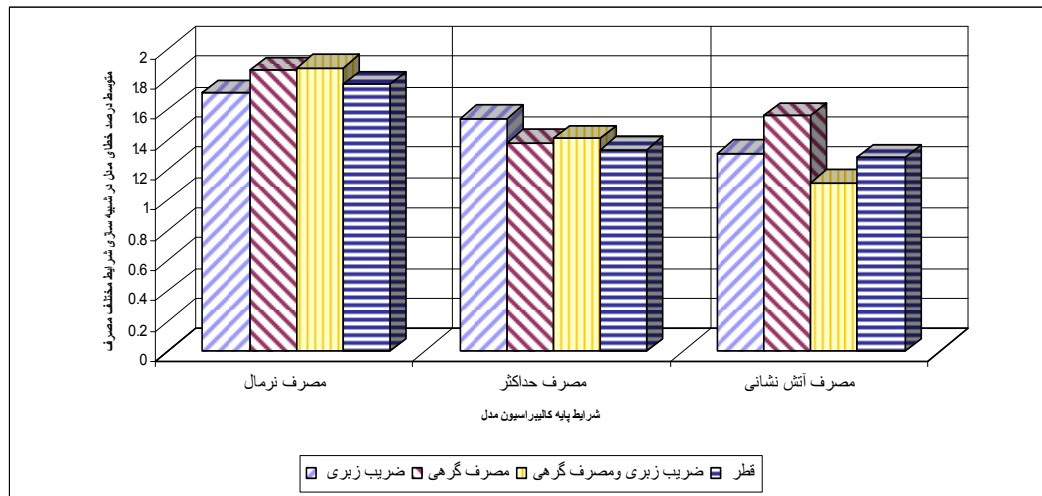
## ۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با تبیین اهمیت کالیبره‌سازی مدل‌های تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب، مشخص شد که نتیجه‌گیری‌های حاصل از مدل‌سازی، در صورتی می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های عملی برای شبکه مورد بررسی باشد، که مدل مورد استفاده کالیبره شده باشد.

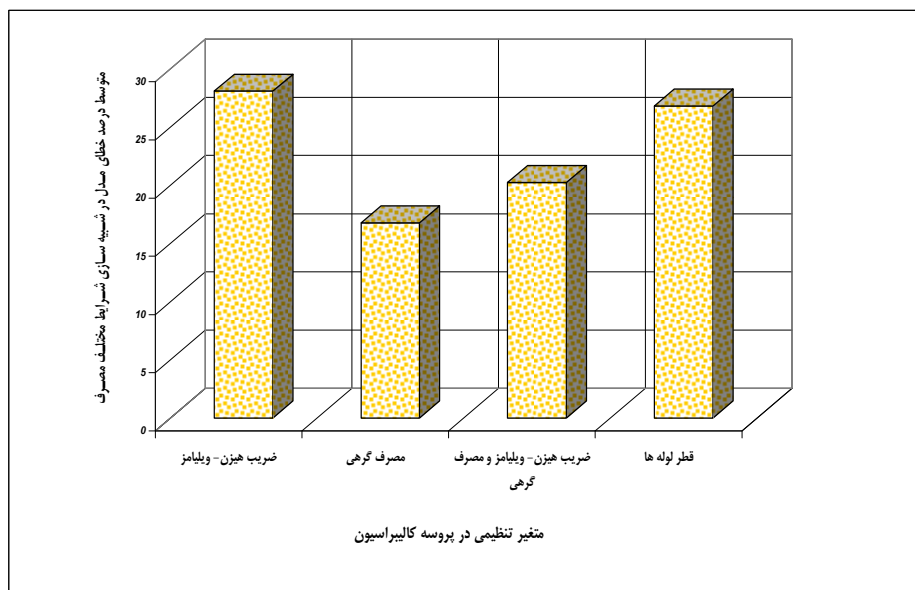
در این مقاله از الگوریتم ژنتیک (GA) به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده شده و جوابهای مسأله به‌ازای مقادیر ذیل برای پارامترهای GA به‌دست آمده است. در این مقاله، تعداد نسل‌ها برابر ۵۰۰ عدد، تعداد جمعیت هر نسل برابر ۳۰۰ رشته، تابع تزویج<sup>۱</sup> از نوع heuristic با احتمال تزویج برابر ۰/۸۶ و تابع جهش<sup>۲</sup> از نوع Gaussian با احتمال جهش برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. در طی سه مرحله، با استفاده از مشاهدات هر چهار حالت پایه مصرف در شبکه، پارامترهای تنظیمی کالیبره‌سازی، به‌عنوان متغیرهای تصمیم مورد نظر مسأله بهینه‌سازی، تنظیم و مدل EPANET کالیبره‌سازی شد. بدیهی است که در شرایطی می‌توان از نتایج به‌صورت مؤثری بهره برد که بتوانند تا حد امکان با درصد خطای کمتر، از عهده شبیه‌سازی سایر شرایط در شبکه برآیند. بنابراین در هر چهار مرحله با قرار دادن مقادیر حاصل از روند کالیبره‌سازی برای هر یک از چهار حالت پایه در مدل EPANET، تحلیل سایر شرایط مصرف در شبکه صورت گرفته و با محاسبه مقدار خطا در پیش‌بینی مقادیر فشار (MAPE) برای چهار گره ۲، ۵، ۹ و ۱۱ نتایج ارزیابی شد. متوسط زمان اجرای مدل و انجام کالیبره‌سازی برای حالت‌های مختلف برابر یک ساعت است.

خطای مدل‌سازی شبکه با استفاده از مقادیر حاصل از کالیبره‌سازی برای تمامی متغیرهای تصمیم مسأله و شرایط مصرف در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. جدول ۳ میزان خطا را در حالت تنظیم همزمان ضرایب زبری و مصارف گرهی طی روند کالیبره‌سازی و در شرایط مختلف مصرف نشان می‌دهد. با اجرای روند پیشنهادی در این مقاله برای کالیبره‌سازی مدل تحلیل هیدرولیکی EPANET، در نظر گرفتن همزمان ضرایب هیزن-ویلیامز

1. Crossover  
2. Mutation



شکل ۳ ارزیابی و مقایسه شرایط پایه و پارامترهای تنظیمی در روند کالیبره‌سازی مدل EPANET



شکل ۴ مقایسه نتایج روند کالیبره‌سازی مدل EPANET در شرایط حداقل مصرف با پارامترهای تنظیمی مختلف

تصمیم مساله در نظر گرفته شد. در ادامه با مطالعه شرایط مختلف مصرف در شبکه‌ای نمونه، مشخص شد که به‌کارگیری مقادیر اندازه‌گیری شده در شرایط مصرف آتش‌نشانی، نتایج مطلوبتری را در کالیبره‌سازی به همراه دارد. همچنین در این شرایط، تنظیم توأم ضرایب زبری لوله‌ها و مصارف گرهی در طی کالیبره‌سازی، کمترین

از این رو با بررسی روشهای مختلف تحلیل هیدرولیکی، با تهیه یک برنامه کامپیوتری در محیط MATLAB7، مدل تحلیل هیدرولیکی EPANET با مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک ادغام شد. در این کار، ضریب زبری لوله‌ها، مصارف گرهی، هر دو پارامتر ضریب زبری لوله‌ها و مصارف گرهی و قطر لوله‌ها به‌عنوان متغیرهای تنظیمی و



ECAC (1999). "Calibration guidelines for water distribution system modeling", Proc. AWWA 1999 Imtech Conference.

Ferreri, G.B., Napoli, E. and Tumbiolo, A. (1994). "Calibration of roughness in water distribution networks", Proc. 2nd Int. Conf. on Water Pipeline Systems, Edinburgh, UK, D. S. Miller, ed., vol. 1, pp. 379-396.

Greco, M., and Del Giudice, G. (1999). "New approach to water distribution network calibration", J. Hydraulic Engineering, ASCE, 125 (8), pp. 849-854.

Haestad Methods, (2005). "WaterGEMS user's guide", Bentley Systems Incorporated, Haestad Methods Solution Center, Watertown, USA.

Kapelan, Z., Savic, D.A. and Walters, G.A. (2003). "Multiobjective sampling design for water distribution model calibration", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 129(6), pp. 466-479.

Lansley, K.E. and Basnet, C. (1991). "Parameter estimation for water distribution networks", J. Water Resources Planning and Management, ASCE, 117(1), pp. 126-144.

Lansley, K.E., El-Shorbagy, W., Ahmed, I., Araujo, J. and Haan, C.T. (2001). "Calibration assessment and data collection for water distribution networks", J. Hydraulic Engineering, ASCE, 127(4), pp. 270-279.

Ormsbee, L.E. (1989). "Implicit network calibration", J. Water Resources Planning and Management, ASCE, 115(2), pp. 243-257.

Ormsbee, L.E. and Lingireddy, S. (1997). "Calibrating hydraulic network models", J. AWWA, 89(2), pp. 42-50.

Ormsbee, L.E. and Wood, D.J. (1986). "Explicit pipe network calibration", J. Water Resources Planning and Management, ASCE, 112(2), pp. 166-182.

Rossman, L.A. (2000), "EPANET2 users manual", Risk Reduction Engineering Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.

Savic, D.A. and Walters, G.A. (1995). "Genetic algorithm techniques for calibrating network models", Report No. 95/12, Centre for Systems and Control Engineering, University of Exeter, p. 41.

درصد خطا را در شبیه‌سازی دیگر شرایط در پی داشته است. همچنین با توجه به خطای بیشتر کالیبره‌سازی در شرایط مصرف حداقل، در نظر گرفتن عدم قطعیت مصارف در این حالت می‌تواند راهگشا باشد. نتایج به‌دست آمده در این زمینه در آینده منتشر خواهد شد.

## ۱۰- منابع

جاماسب، م. (۱۳۸۵). "کالیبره‌سازی انواع مدل های تحلیل هیدرولیکی شبکه های توزیع آب شهری"، رساله کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

Bhave, P.R. (1988). "Calibrating water distribution network models", J. Environmental Engineering, 114(1), pp. 120-136.

Behzadian K., Kapelan Z., Savic D. and Ardeshir A. (2007). "Stochastic sampling design for water calibration", Proc. of Water Management Challenges in Global Chang (CCWI2007), Ulanichi, B., Vairavamoorthy, K., Butler, D., Bounds, P., Memon, F., (eds.), University of De Mount Fort, Leicester, UK, Taylor & Francis, pp. 185-193.

Borzi, A., Gerbino, E., Bovis, S. and Corradini, M. (2005). "Genetic algorithms for water distribution network calibration: a real application", Proc. of the 8th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, University of Exeter, UK, pp. 149-154.

Boulos, P.F. and Wood, D.J. (1990). "Explicit calculation of pipe-network parameters", J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 116(11), pp. 1329-1344.

Boulos, P.F. and Wood, D.J. (1991). "An explicit algorithm for calculating operating parameters for water networks", Civil Engineering Systems, 8, pp. 115-122.

Colombo, A.F. and Giustolisi (2007). "A metamodelling approach for water distribution system calibration", Proc. of Water Management Challenges in Global Chang (CCWI2007), Ulanichi, B., Vairavamoorthy, K., Butler, D., Bounds, P., Memon, F., (eds.), University of De Mount Fort, Leicester, UK, Taylor & Francis, pp. 137-142.

Computing and Control for the Water Industry, University of Exeter, UK, pp. 155-159.

Walski, T.M. (1983). "Technique for calibrating network models", J. Water Resources Planning and Management, ASCE, 109(4), pp. 360-372.

Walski, T.M. (2000). "Model calibration data: the good, the bad, and the useless", J. AWWA, 92(1), pp. 94-99.

Shamir, U. and Howard, C.D.D. (1968). "Water distribution systems analysis", J. of the Hydraulic Division, ASCE, 94(1), pp. 219-234.

Shamir, U. and Howard, C.D.D. (1977). "Engineering analysis of water distribution system", J. AWWA, 69(9), pp. 510-514.

Vassiljev, A., Koppel, T. and Puust, R. (2005). "Calibration of the model of operational water distribution system", Proc. of the 8th Int. Conf. on