

بکارگیری الگوریتم ژنتیک در مسأله معکوس تخمین ضرایب زبری لوله‌ها در شبکه‌های تحت فشار

مریم شهبازی^۱، جمال محمد ولی سامانی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

* تهران، صندوق پستی ۳۳۶-۱۴۱۱۵

Samani_j @ modares.ac.ir

چکیده- مدتی پس از زمان بهره‌برداری سیستم‌های تحت فشار، مشخصات لوله‌ها به علت تغییر در زبری و در پی آن کاهش ظرفیت هیدرولیکی، تغییر کرده و مانع بهره‌برداری رضایت‌بخش و کارکرد مناسب شبکه می‌شود. تعمیر و واسنجی شبکه‌های موجود، امروز یکی از مسائل مهم در زمینه صنعت آب است. هدف در این تحقیق، تخمین ضرایب زبری در سیستم‌های تحت فشار یا به بیان دیگر، واسنجی زبری برای اهداف تعمیراتی است. به طور خلاصه، واسنجی خطوط لوله با دو هدف اصلی انجام می‌شود: ۱- نشت‌یابی، ۲- تعیین ظرفیت شبکه و توسعه خطوط لوله. از آنجا که به علت مدفون بودن لوله‌های شبکه‌های آبرسانی، تعیین ضرایب زبری به صورت مستقیم و با اندازه‌گیری گسترده فشار و جریان و سپس تحلیل آنها به کمک مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولیکی امکان‌پذیر نیست، در تحقیق حاضر، روشی با استفاده از بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و مدل‌سازی معکوس هیدرولیک جریان ماندگار در خطوط لوله ارائه خواهد شد. در شرایط آزمایشی مشخص، مقادیر فشار در تعدادی از نقاط شاهد، در چند ساعت از شبانه روز اندازه‌گیری می‌شوند. سپس نوعی تابع هدف با معیار کمینه‌سازی مربع اختلاف مقادیر فشار اندازه‌گیری شده و محاسباتی در نقاط شاهد تعریف شده و با استفاده از بهینه‌سازی ژنتیکی پارامترهای مجهول ضرایب زبری به صورت معکوس تخمین زده می‌شوند. کاربرد این روش و توانمندی آن با استفاده از یک مثال نشان داده خواهد شد.

کلیدواژگان: شبکه‌های تحت فشار، واسنجی ضرایب زبری، بهینه‌یابی، الگوریتم ژنتیک، مسأله معکوس.

استانداردهای کیفیت آب است. به منظور شبیه‌سازی عددی رفتار شبکه‌های توزیع آب شهری، مدل‌های ریاضی متنوعی وجود دارد. برای هرگونه استفاده معنادار، این

۱- مقدمه

هدف هر سیستم توزیع، تحویل آب به مصرف‌کننده در زمان نیاز، به مقدار لازم، با فشار کافی و بر طبق

شبکه‌ها و واسنجی و تعمیر آنها، توجه بسیاری از مدیران و کارشناسان را به خود جلب کرده و جزو مسائل مهم در زمینه صنعت آب به‌شمار می‌رود. به دلیل اهمیت این موضوع و بی‌توجهی به مسائل مربوط به مدیریت بهره‌برداری از شبکه‌ها در کشور، در این تحقیق سعی بر ارائه روشی مناسب و کارآمد با دقت کافی برای واسنجی شبکه‌های در دست بهره‌برداری می‌باشد.

برای واسنجی شبکه‌ها تاکنون روشهای متعددی توسط محققان مختلف ارائه شده است. مدل‌های واسنجی شبکه‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند: مدل‌های تکراری یا آزمون و خطا، مدل‌های صریح یا شبیه‌سازی هیدرولیکی، مدل‌های ضمنی یا بهینه‌سازی. اخیراً بیشتر از روشهای ضمنی استفاده می‌شود که در این روشها مسأله واسنجی به صورت نوعی مدل بهینه‌سازی بیان و حل می‌شود.

Savic and Walters (1995) اولین کسانی بودند که روش جستجوی الگوریتم ژنتیک (GA) را برای واسنجی ضریب زبری و نشت یابی شبکه‌های توزیع آب به کار گرفتند.

Reddy et al. (1996) روش گاوس-نیوتن را برای حل مسأله واسنجی شبکه‌های با جریان ماندگار با تابع هدف از نوع حداقل مجذورات وزنی به کار بردند. روش گاوس- نیوتن برای اجرا نیاز به محاسبه عناصر ماتریسهای ژاکوبین و هیزن دارد که باعث می‌شود تا این روش به علت استفاده از تکرار، حافظه و زمان زیادی را در کامپیوتر مصرف کند. ماتریس ژاکوبین مشتقات مرتبه اول متغیرهای وابسته نسبت به تمامی پارامترهای واسنجی و ماتریس هیزن مشتقات مرتبه دوم متغیرهای وابسته نسبت به تمام پارامترهای واسنجی است. این محققان عناصر این ماتریسها را با روشی به نام معادله حساسیت محاسبه کردند. پارامترهای واسنجی شامل ضریب زبری

مدل‌های عددی باید ابتدا واسنجی شوند. بر طبق تعریف، در فرایند واسنجی، تعدادی از پارامترهای مدل عددی شبکه تا زمانی که رفتار مدل عددی و شبکه واقعی تا حد امکان به هم نزدیک شوند، تنظیم می‌شوند. (Walski, 1983) پس از واسنجی مدل عددی، این مدل که شکل چکیده و ساده شده رفتار سیستم واقعی است، به منظور اطمینان از درستی جوابها صحت‌سنجی شده تا برای استفاده مطمئن در شبیه‌سازی‌های آینده آماده گردد. پس از واسنجی مدل، گام بعدی واسنجی شبکه است. واسنجی سیستم تحت فشار یا شبکه موجود، به معنای تخمین مشخصه‌های فیزیکی و بهره‌برداری شبکه خاص است. در ابتدای احداث شبکه تحت فشار، شبکه باید در مواردی مانند مقدار نشت، تراز سطح آب در مخازن و مانند آن واسنجی شده و مقادیر واقعی این پارامترها به منظور بهره‌برداری صحیح در شبکه تعیین شوند.

هنگامی که مدتی پس از زمان بهره‌برداری سیستم توزیع آب شهری، مشخصات شبکه به علت کهنگی لوله‌ها، افزایش نشت یا تغییر در زبری لوله‌ها تغییر می‌کند، تحلیل چنین شبکه‌ای با استفاده از اطلاعات زمان طراحی، باعث بهره‌برداری نامطلوب و کارکرد نامناسب شبکه می‌شود. به همین دلیل، بیشتر شبکه‌های فعلی نمی‌توانند در حل کوتاه‌مدت مشکلات کمی و کیفی مانند تلفات آب، کاهش فشار در شبکه، شکستگی لوله‌ها و نبود کنترل کافی در توزیع آب با کیفیت بالا - که می‌تواند خطر گسترش آلودگی را نیز به دنبال داشته باشند - مفید باشند. با اعمال مدیریت کمی و کیفی پویا در قالب مدل‌سازی و واسنجی مجدد شبکه‌های توزیع می‌توان رفتار هیدرولیکی و دینامیکی شبکه‌ها را در شرایط فعلی به تصویر کشید و مشکلات موجود را شناسایی کرد و راه‌های مناسب را برای آن ارائه کرد. در این راستا فناوری مطالعه رفتار

مهمترین تفاوت آنها در این است که GA در یافتن بهینه سراسری^۳ و LM در یافتن بهینه محلی^۴ بسیار توانمند هستند. یکی از معایب الگوریتم ژنتیک آن است که در یافتن بهینه سراسری بسیار بهتر از بهینه محلی عمل می‌کند؛ به این معنا که به سرعت بازه‌ای از تعدادی جوابهای بهینه ممکن را پیدا کرده سپس به‌کندی برای یافتن مقدار دقیق نقطه بهینه اصلی حرکت می‌کند. به این ویژگی الگوریتم ژنتیک «مشکل اتمام کند»^۵ گفته می‌شود. در این روش جدید بهینه‌یابی دوگانه، GA و LM در کنار هم به‌کار گرفته می‌شوند تا معایب هر کدام رفع شود. در این روش در مرحله اول الگوریتم ژنتیک با تولید جمعیتی از جوابهای ممکن شروع به کار می‌کند و تا زمانی که معیار پایان کار GA ارضا نشده، کار GA ادامه می‌یابد. بعد از آن در مرحله دوم، LM شروع به‌کار کرده و از بهترین جوابهایی که در مرحله اول توسط GA پیدا شده به‌عنوان نقطه شروع استفاده می‌کند. در نتیجه، مشکلات ناشی از اتمام کند GA و مشکل ناشی از گیرافتادن LM در نقطه بهینه محلی غلط - که ناشی از شروع از نقطه اشتباه است - به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

یکی از مواردی که در تحقیق حاضر به‌منظور بهبود کارهای دیگران انجام شده آن است که به‌روش و چگونگی استفاده از الگوریتم ژنتیک به‌طور جدی و با حساسیت بیشتری پرداخته شد. به این منظور تلاش شده تا مشخصه‌های کلیدی الگوریتم ژنتیک مورد ارزیابی و تحلیل حساسیت قرار گرفته و الگوریتم ژنتیک مناسبی برای حل مسائلی از نوع مسأله مطرح در این تحقیق معرفی شود. یکی دیگر از موارد مهم در این تحقیق، پرداختن به تحلیل حساسیت در انتخاب گره‌های شاهد است.

هیزن ویلیامز و مصارف گرهی در شرایط جریان ماندگار و شبه‌ماندگار بود. روش آنها روی سه شبکه که یکی واقعی بود، به‌طور موفق آزمایش شد. آنها مقدار $n=2$ را برای توان تابع هدف پیشنهاد کردند.

(1999) Todini برای واسنجی مدل جریان ماندگار شبکه از روش جدیدی بنام فیلتر کالمن استفاده کرد که این روش قبلاً در واسنجی مدل جریان آبهای زیرزمینی با موفقیت به‌کار گرفته شده بود. او مسأله بهینه‌سازی خود را که تابع هدف آن از نوع حداقل مجذورات استاندارد بود، برای واسنجی ضرایب زبری لوله‌ها تعریف کرد. روش فیلتر کالمن یکی از روشهای حل مسائل معکوس^۱ است و اساساً در روشهای حل این مسائل در زیر گروه مسائل معکوس خطی بازگشتی^۲ قرار دارد و در شرایطی استفاده می‌شود که بردار معلومات مسأله به‌تدریج و به‌طور دینامیک با زمان و با رسیدن داده‌های جدید و تخمین‌های جدید کامل می‌شود. از آنجا که تخمین ضریب زبری لوله‌ها از طریق مقادیر فشار و دبی در شبکه و به‌طور معکوس قابل حصول است، استفاده از این روش معقول به‌نظر می‌رسد.

(2002) Kapelan در رساله دکتری خود با عنوان "واسنجی مدل‌های هیدرولیکی سیستمهای توزیع آب" روش جدیدی را برای واسنجی سیستمهای تحت فشار ارائه کرد. مسأله واسنجی او در این رساله از نوع بهینه‌سازی مقید و با تابع هدفی از نوع حداقل مجذورات وزنی بود. روش جدید اشاره شده HGA یا Hybrid GA یا الگوریتم ژنتیک ترکیبی نام دارد که از اتصال دو روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک یا GA و روش Levenberg- Marquadrat یا LM توسعه یافته است. هر یک از این دو روش مزایا و معایب خود را دارند.

3. Global Search
4. Local Search
5. Slow finishing problem

1. Inverse Problem
2. Recursive linear Inverse Problems

۲- مواد و مبانی نظری

هدف از این تحقیق تخمین ضرایب زبری در شبکه‌های تحت فشار در دست بهره‌برداری است. همانطور که پیشتر گفته شد، از آنجا که به علت مدفون بودن لوله‌های شبکه‌های آبرسانی، تعیین ضرایب زبری به صورت مستقیم و با اندازه‌گیری گسترده فشار و جریان در تمامی گره‌های شبکه و سپس تحلیل آنها به کمک مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولیکی امکان‌پذیر نیست، در تحقیق حاضر، روشی ضمنی با استفاده از بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و مدل‌سازی معکوس هیدرولیکی جریان ماندگار در خطوط لوله ارائه خواهد شد. یکی از مفاهیم مطرح در تحلیل معکوس هیدرولیکی شبکه، مفهوم مسأله معکوس است.

۲-۱- مسائل معکوس

به‌تازگی برای شناخت پدیده‌های مختلف از روشی به نام مسأله معکوس استفاده می‌شود. دلیل پیدایش این روش آن است که محاسبه یا اندازه‌گیری برخی کمیت‌های فیزیکی مشکل و هزینه‌بر است، اما با به‌کارگیری روشهای غیرمستقیم مانند روش معکوس، می‌توان مقدار آنها را از طریق راه‌هایی میانبر به دست آورد. در این راه میانبر یا روش معکوس، اندازه‌گیری سایر کمیت‌های در دسترس‌تر در باره پدیده مورد نظر و ایجاد رابطه‌ای بین این دو برای محاسبه کمیت‌های دلخواه مد نظر قرار می‌گیرد. در تعریف فیزیکی، مسأله معکوس به مسأله‌ای گفته می‌شود که در آن آثار حاصل از پدیده‌ای را اندازه‌گیری کرده و در پی تخمین علت یا علت‌های این آثار باشد. تحلیل معکوس معمولاً به‌عنوان روشی تعریف می‌شود که می‌تواند پارامترهای کنترل‌کننده سیستم را از طریق تحلیل رفتار خروجی آن سیستم تعیین کند (جلیلی، ۱۳۸۰). در این تحقیق ضرایب زبری از طریق اندازه‌گیری فشار محاسبه می‌شوند؛ در واقع ضریب زبری یکی از عوامل به‌وجود آورنده و مؤثر بر فشار است و فشار اثر یا خروجی حاصل

از مجموعه‌ای از عوامل موجود در شبکه آبرسانی است. ضریب زبری - علاوه بر اینکه همانطور که گفته شد قابل اندازه‌گیری مستقیم از طریق ثبت گسترده مقادیر فشار و جریان نیست - یکی از پارامترهای ورودی به مدل تحلیل هیدرولیکی شبکه است که ما آن را از طریق اندازه‌گیری خروجی مدل هیدرولیکی شبکه یعنی فشارها، آن هم در نقاط گسسته و محدودی از شبکه به دست می‌آوریم.

روش مسأله معکوس در واقع بر پایه معکوس‌سازی ریاضی معادلات توصیف‌کننده رفتار فیزیکی پدیده مورد مطالعه استوار است. این وضعیت تقریباً هیچ‌گاه در عمل در رابطه با مسائل واقعی و فیزیکی اتفاق نمی‌افتد و به طور کلی این که هر مسأله معکوس به شکل ماتریسی مربعی معکوس‌پذیر باشد و آن را با معکوس‌سازی حل کنیم فرض درستی نیست. در نتیجه روش معکوس در ترکیب با روشهای کارامدی مانند بهینه‌سازی، به شکل مناسب کار می‌کند. جوابها در روش معکوس بایستی از طریق روشهای عددی پیشرفته، استفاده از الگوریتم‌های قوی بهینه‌سازی و غیره تعدیل گردد. روش مسأله معکوس معمولاً از دو قسمت تشکیل شده است: مدل شبیه‌سازی و الگوریتم بهینه‌سازی. تحقیقات نشان داده که با انتخاب مناسب مدل شبیه‌سازی و روش بهینه‌سازی، روشهای معکوس می‌توانند جوابها را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند. موفقیت در تخمین درست مسأله معکوس، به میزان توجه به دو ویژگی محدود کننده در این روش بستگی دارد که در بخش ۳-۲ به آنها پرداخته می‌شود. این دو مشکل عبارتند از: قابل تعیین بودن^۱ مسأله و یکتایی^۲ جوابها. همان‌طور که از بحث بالا برمی‌آید در فرایند حل معکوس هر پدیده فیزیکی، جدا از مفهوم مسأله معکوس، مفهوم دیگری نیز به نام بهینه‌سازی^۳ مطرح است.

1. Identifiably
2. Uniqueness
3. Optimization

۲-۲- بهینه‌سازی

بهینه‌سازی مجموعه تلاشهایی است که بر بهبود مفهوم اولیه به منظور حداکثرسازی یا حداقل‌یابی تابع هدف تمرکز دارند. عناصر تشکیل دهنده هر مدل بهینه‌سازی عبارتند از:

۱- متغیرهای تصمیم‌گیری^۱ که در واقع مجهولاتی هستند که باید از روی جواب مدل تعیین شوند.

۲- قیود و محدودیت‌ها^۲ که برای توصیف محدودیت‌های فیزیکی پدیده، مدل بهینه‌سازی باید آنها را ارضا کند.

۳- تابع هدف^۳ که میزان سودمندی پدیده را به صورت تابعی از متغیرهای تصمیم‌گیری تعریف می‌کند. برای مثال اگر هدف کمینه‌سازی هزینه کل باشد، تابع هدف باید هزینه‌ها را بر حسب متغیرهای تصمیم‌گیری مشخص کند. به‌طور کلی جواب بهینه برای مدل در صورتی به‌دست آمده که مقادیر متناظر متغیرهای تصمیم‌گیری، ضمن صدق کردن در تمامی قیود، بهترین مقدار تابع هدف را به‌دست دهند. این بدان معنا است که برای دستیابی به جواب بهینه، تابع هدف مانند نوعی شاخص عمل می‌کند. روشهای مختلفی برای انجام بهینه‌سازی وجود دارد، اما عیب مشترک بسیاری از الگوریتمهای بهینه‌یابی، ناتوانی آنها در تمیز دادن بهینه محلی از بهینه فراگیر است. راه‌حلی منطقی برای حل مسائل بهینه‌سازی گسسته با بهینه‌های چندگانه، استفاده از فنون جستجوی تکاملی-اتفاقی، با به‌کارگیری روشهای بهینه‌یابی جستجوی تکاملی طبیعی است که از کل فضای جستجو برای یافتن بهینه فراگیر نمونه‌برداری می‌کند. به‌تازگی بسیاری از محققان در زمینه بهینه‌سازی، به‌جای استفاده از روشهای سنتی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی یا غیرخطی، در زمینه

به‌کارگیری روشهای جدید مبتنی بر قوانین طبیعت در بقای مناسبترین‌ها^۴ و جستجوی تکاملی کار کرده‌اند. در تحقیق حاضر با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک به‌عنوان روشی فراکاشی و قدرتمند در بهینه‌یابی تابع هدف، مقادیر ضرایب زبری لوله‌ها بر اساس تابع هدفی با معیار کمینه‌سازی مقادیر اندازه‌گیری و محاسباتی فشار تعیین می‌شوند.

۲-۳- الگوریتم ژنتیک

در دهه ۱۹۷۰ میلادی جان هلند از دانشگاه میشیگان فکر استفاده از الگوریتم ژنتیک را در بهینه‌سازی مسائل مهندسی مطرح کرد. ایده اساسی این الگوریتم انتقال خصوصیات موروثی توسط ژن‌ها^۵ است. الگوریتم‌های ژنتیک بر پایه قوانین ژنتیک و فرایند طبیعی گزینش استوار بوده و برای یافتن پاسخ پرسشهایی سخت از نوع به‌گزینی ساخته شده‌اند. همانطور که گفته شد دلیل پیدایش این روش بهینه‌سازی، ناکارآمدی بعضی از الگوریتم‌های قبلی بود که جستجو به دنبال بهینه‌ترین مقدار تابع هزینه را با مجموعه‌ای از مقادیر اولیه برای پارامترها آغاز می‌کردند. این جستجوگرها ممکن است به‌سادگی در دام بهینه‌های محلی گرفتار شوند، اما معمولاً سرعت همگرایی در آنها بالا است. در انواع جدید روشهای بهینه‌سازی، از الگوریتم‌هایی استفاده می‌شود که در طی آنها تغییراتی اتفاقی نیز در روند بهینه‌سازی تأثیر (مثبت) می‌گذارند. در الگوریتم ژنتیک، این کار به‌کمک جهش ژنی یا موتاسیون^۶ انجام می‌شود. این تغییرات اتفاقی می‌تواند از گرفتار شدن الگوریتم در دام نقاط بهینه محلی جلوگیری کند. این روشها نسبت به نوع قبلی

4. Fittest
5. Gene
6. Mutation

1. Design Variable
2. Constrains
3. Objective Function

از زبان فرتن در مدل سازی هیدرولیکی استفاده می شود. محاسبات هیدرولیکی و بهینه سازی در فرایندی تکراری به یکدیگر متصل می شوند و تا رسیدن به حداقل تابع هدف تکرار ادامه می یابد. به منظور تحلیل جریان ماندگار در شبکه مقدار مصارف طرح در محل گره ها به عنوان ورودی مدل اعمال می شود. سپس با توسعه معادلات حاکم (معادلات پیوستگی جریان (معادله ۱) و انرژی (معادله ۲)) یک دستگاه معادلات غیرخطی تشکیل می شود که پس از تحلیل آن به روشهای عددی مناسب می توان به پارامترهای هیدرولیکی شبکه دست یافت. از نظر عملکرد و سادگی کاربرد، بهترین روش برای حل معادلات حاکم بر شبکه های آبرسانی، روش نیوتن-رافسون است که به حل معادلات H (معادله ۳) می پردازد:

$$\sum_{i=1}^{N_j} Q_{ij} + C_j = 0 \quad j=1, \dots, N_j \quad (1)$$

$$H_i - H_j = K_{ij} Q_{ij}^{1.85} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{N_j} \left[\frac{H_i - H_j}{K_{ij}} \right]^{\frac{1}{1.85}} + C_j = 0 \quad j=1, \dots, N_j \quad (3)$$

در روابط بالا، Q_{ij} دبی عبوری از گره i به طرف گره j یا به عکس، C_j دبی مصرفی در گره j ، N_j تعداد لوله هایی که به هر گره ختم می شوند، H فشار در گره ها و K توصیفگر ویژگیهای ثابت لوله مانند طول، قطر و زبری است.

روش به کار رفته در این تحقیق به طور خلاصه شامل مراحل زیر است:

۱- ساعتی از شبانه روز به عنوان ساعت آزمون انتخاب و آمارگیری های مورد نیاز مانند اندازه گیری فشار در گره های مورد نظر در این زمان مشخص انجام می شود. بهتر است ساعت آزمون در ساعت اوج مصرف باشد، زیرا بر طبق روابط مقاومت جریان مانند رابطه داری و سیباخ، افت انرژی یا همان افت فشار، رابطه ای مستقیم

سرعت همگرایی کمتری دارند، اما در به دست آوردن نقطه بهینه مطلق بسیار موفق تر عمل می کنند. اولین ویژگی مثبت الگوریتم ژنتیک دستیابی به نقطه بهینه کلی به جای نقطه بهینه محلی است. یعنی همیشه و در حد بسیار خوبی می توان به پاسخ این الگوریتم اعتماد کرد و پاسخی که می یابد به احتمال بسیار قوی، بهترین پاسخ ممکن است. علاوه بر این الگوریتم ژنتیک در حل انواع مسائل بهینه سازی بسیار کارآمد بوده و به نوع خاصی از مسائل محدود نیست، زیرا نیازی به استفاده از مشتقات تابع هدف ندارد و فقط مقدار هزینه ناشی از تابع هدف، ملاک بهینه سازی است. لذا تابع هدف محدود به توابع ریاضی نیست بلکه می تواند نتایج آزمایش ها یا نموداری از اعداد و مانند آن باشد. به بیان دیگر فقط هزینه است که ملاک بهینه سازی قرار می گیرد نه علت آن (حقیقی، ۱۳۸۳).

۳- روشها

در این بخش، نخست روش به کار گرفته شده در این تحقیق تشریح شده و در بخش ۳-۲ قابلیت و دقت روش معرفی شده صحت سنجی می شود.

۳-۱- واسنجی زبری به روش حل معکوس هیدرولیکی جریان ماندگار و شبه ماندگار در شبکه های آبرسانی

در این تحقیق برای تحلیل معکوس هیدرولیکی شبکه به منظور یافتن ضریب زبری، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه یابی جوابها و مدل عددی NET_QC برای تحلیل هیدرولیکی شبکه به روش نیوتن-رافسون استفاده شده است (صحت سنجی مدل عددی: Samani and Naeeni, 1996). از نرم افزار متلب^۱ برای اجرای الگوریتم ژنتیک و

1. MATLAB

$$Fitness = \sum_{i=1}^m (P(No_ntest(i)) - P'(No_ntest(i)))^K$$

K= یک عدد زوج

$P(No_ntest(i))=i$ فشار محاسباتی در گره آزمون

$P'(No_ntest(i))=i$ فشار اندازه‌گیری شده در گره آزمون

با کمینه‌سازی تابع هدف مزبور مقدار تابع هزینه به صفر می‌رسد و این بدان معنا است که فشارهای محاسباتی با فشارهای اندازه‌گیری شده در گره‌های آزمون برابر شده و ضرایب زبری متناظر با فشارهای محاسباتی همان ضرایب زبری موجود در شبکه در ساعت آزمون است.

۵- از آنجا که فشار در هر گره، تابعی از کل ضرایب زبری لوله‌ها در شبکه آبرسانی است، با تغییر ضریب زبری لوله ممکن است تمامی فشارها در گره‌های شبکه دستخوش تغییر شوند. بنابراین ضرایب زبری متغیرهای مستقل و فشارها، متغیرهایی وابسته‌اند.

$$P(i) = f(C)$$

$$C = [C_1, C_2, \dots, C_n]$$

پس از تشکیل تابع هدف n بعدی، الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت اولیه شروع به کار می‌کند که این جمعیت اولیه شامل چند کروموزوم است که به‌طور تصادفی تولید می‌شوند. کروموزوم i ام تابع هدف در این تحقیق به‌صورت زیر است:

$$Chromosome(i) = [C_1, C_2, \dots, C_n]$$

سپس برای هر کروموزوم یک برازندگی یا هزینه بر اساس تابع هدف به‌دست می‌آید. برای این منظور لازم است به‌ازای هر کروموزوم (ضرایب زبری لوله‌ها) شبکه آبرسانی یک بار تحلیل شود تا فشارهای متناظر با این کروموزوم محاسبه شوند. در مراحل بعدی، الگوریتم ژنتیک در سه مرحله بازآفرینش، پیوند و جهش، روند تکاملی خود را طی کرده و در پایان بهترین کروموزوم مربوط به آخرین نسل - که در واقع همان ضرایب زبری شبکه در ساعت آزمون است - به‌عنوان خروجی و جواب بهینه مسئله واسنجی معرفی می‌شود.

با سرعت در لوله‌ها دارد و مقدار افت در زمان اوج مصرف بیشینه است، در نتیجه اثر ضریب اصطکاک (f) دارسی ویسباخ یا C هیزن ویلیامز) در زمان بیشترین مصرف، بهتر دیده می‌شود.

۲- شبکه از نظر هندسی و جغرافیایی به مدل معرفی می‌شود. (محل گره‌ها، رقوم مخازن و گره‌ها، مشخصات لوله‌ها مانند قطر، طول، جنس و مشخصات تأسیساتی مانند مشخصات شیرها و پمپها) همچنین مشخصات هیدرولیکی

۳- با انتخاب چند گره به نام گره‌های آزمون (گره‌هایی که امکان اندازه‌گیری فشار در آنها وجود داشته باشد) فشار در ساعت آزمون اندازه‌گیری می‌شود. در صورتی که تمامی n گره مورد اندازه‌گیری فشار قرار گیرند، با نوشتن معادلات H به‌سادگی می‌توان تمامی n مجهول را در لوله‌ها محاسبه کرد. اما با توجه به اینکه خطوط لوله و تأسیسات شبکه‌ها بیشتر از درون خاک عبور می‌کنند، فرض بر این است که فقط m گره از n گره در دسترس است، و در صورتی که بخواهیم فقط با استفاده از روابط هیدرولیکی معرف شبکه آبرسانی - مانند معادلات H- شبکه را تحلیل کنیم لازم است n معادله در دست داشته باشیم (زیرا تعیین n مجهول از روی m معادله وقتی $m < n$ ممکن نیست) و این دستگاه معادلات غیرخطی (m تایی) به‌وسیله ابزار قدرتمندی به‌نام بهینه‌سازی و با تعریف تابع هدف مناسبی برای حل مسأله، حل می‌شود. در نتیجه برای تعیین زبریها لازم است شبکه آبرسانی به‌صورت معکوس تحلیل شود.

۴- پس از تشکیل m معادله و n مجهول، تابع هدف مناسبی برای کمینه‌سازی اختلاف بین مقادیر فشار محاسباتی و اندازه‌گیری شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعریف می‌شود. بدیهی است که در این شرایط، متغیرهای تصمیم‌گیری مورد نظر مقادیر ضریب افت دارسی ویسباخ یا هیزن ویلیامز در خطوط لوله است:

قابل توجهی روبه‌رو باشند. از آنجا که روش برای حالات مختلف قابل تکرار است، نتایجی که در چند آزمون یکسان باشند قطعی در نظر گرفته می‌شوند. در این تحقیق چهار مورد زیر در راستای یک به یک شدن جوابها رعایت شده است:

۶- در مرحله بعدی از آنجا که حل مسأله واسنجی، همان‌طور که پیشتر توضیح داده شد، به‌صورت مسأله معکوس است، در مورد یکتایی نتایج حاصل از این مدل معکوس بحث و در واقع مدل صحت‌سنجی می‌شود.

۳-۲- صحت سنجی

موفقیت در تخمین صحیح جوابها در هر مسأله معکوس، به میزان توجه به دو ویژگی زیر بستگی دارد:

- قابل تعیین بودن مسأله: بر طبق تعریف، اگر بیش از یک مجموعه از پارامترها به پاسخ یکسانی در مدل ریاضی منجر شوند، مسأله قابل تعیین نیست. در این تعریف، منظور مسأله مستقیم معادل است. در شبکه‌های تحت فشار دو مجموعه ضریب زبری هیچگاه منجر به بروز فشار یا دبی یکسانی در شبکه نخواهند شد و مدل همیشه جواب مشخصی دارد.

- یکتایی مسأله، اگر یک خروجی مدل ریاضی (فشار) منجر به تخمین بیش از یک مجموعه از پارامترهای اولیه مدل (زبری) توسط مسأله معکوس شود، مسأله غیر یکتاست. به‌طور کلی سه علت اصلی را می‌توان برای یک به یک نبودن پاسخها در نظر گرفت: ۱- تعداد گره‌های آزمون بسیار اندک باشد. ۲- همان گره‌های اندک در نقاط غیرحساس شبکه در نظر گرفته شده باشند و ۳- (مهمتر از بقیه)، شرایطی حاکم باشد که دبی جریان یافته در لوله‌ها حداقل یا حتی برابر صفر باشد. به‌عنوان مثال انجام آزمایش واسنجی در نیمه‌شب نتیجه رضایت‌بخشی نخواهد داشت اما نتایج مربوط به شرایط مصرف بالا- به این علت که تمامی لوله‌ها درگیر عبور دبی قابل توجهی هستند- از دقت بالایی برخوردار است. به بیان ساده، راه اثبات یکتایی جوابها این است که مطمئن شویم اولاً گره‌های آزمون از حساسیت نسبی بالایی نسبت به مجهولات برخوردارند و دوم آنکه تمامی لوله‌ها با دبی

۱- تحلیل حساسیت مشخصه‌های الگوریتم ژنتیک
مشخصه‌های الگوریتم ژنتیک را می‌توان برای حل مسائل مختلف به‌کمک تحلیل حساسیت بهینه کرد (جدول ۱)، اما تعیین مشخصه‌های مناسب الگوریتم ژنتیک برای حل هر مسأله خاص، بسیار به تجربه کاربر بستگی دارد. خوشبختانه در این تحقیق، مقدار حداقل مطلق تابع هدف (صفر) مشخص است. یعنی جواب مسأله بهینه‌سازی معلوم است. با به‌کارگیری این مشخصات در الگوریتم ژنتیک اطمینان از بهینه مطلق بودن جوابها بالا می‌رود.

جدول ۱ مشخصه‌های GA پیشنهادی

| |
|---|
| <i>Population Size: 50</i> |
| <i>Fitness Scaling(natural selection): Rank</i> |
| <i>Selection(pairing): Stochastic Uniform</i> |
| <i>Reproduction: 2Elite</i> |
| <i>Mutation: Uniform 2%</i> |
| <i>Crossover: Scattered</i> |
| <i>Migration: Forward</i> |
| <i>Max Generation: 200</i> |
| <i>Tol. Function: .000001</i> |

۲- تحلیل حساسیت برای انتخاب گره‌های آزمون
انتخاب گره‌های آزمون پس از بازدیدهای میدانی و بررسی نقشه‌های موجود انجام می‌شود. هر چه تعداد بیشتری گره آزمون انتخاب شود، قابلیت اطمینان نتایج نیز

$$SS_j = \sum_{i=1}^{NP} \left| \frac{\partial P_j}{\partial C_i} \right| \quad (5)$$

۳- حل مثالهایی با پاسخ مشخص

بهترین روش برای پی بردن به صحت هر مدل عددی، حل مثالهایی است که راه حلهایی تحلیلی دارند و یا جواب آنها با دقت مناسبی در دست است. در این تحقیق مثالهایی را توسط مدل معکوس پیشنهادی با فرض معین بودن فشارها و مجهول بودن ضرایب زبری به این صورت حل می‌کنیم که نخست با مجموعه‌ای از ضرایب زبری معلوم (ضرایب زبری اولیه یا مفروض) شبکه تحت فشار توسط برنامه تحلیل هیدرولیکی شبکه تحلیل می‌شود و فشارهای محاسباتی حاصل از این ضرایب زبری معلوم در مدل معکوس به‌عنوان فشارهای اندازه‌گیری شده قرار داده می‌شوند. از آنجا که تفاوت این دو فشار به علت مساوی بودن برابر صفر می‌شود، اگر مدل معکوس در تمامی مراحل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی درست کار کند، باید خروجی آن همان ضرایب زبری اولیه‌ای باشد که فرض شده است. در مثال این روش اجرا شده است.

۴- واسنجی در ساعات آزمون متعدد

کالیبره‌سازی شبکه را در یک روز، در چند ساعت مختلف آزمون می‌توان انجام داد. از آنجا که مصرف آب در شهر در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز تغییر می‌کند، می‌توان مصارف عادی ساعتی را برای چند ساعت در شبانه‌روز مانند ساعتهای حداکثر و متوسط مصرف روزانه، در گره‌های شبکه با استفاده از نمودارهای مربوطه محاسبه کرد و یک شبکه خاص را در چند ساعت مختلف آزمون واسنجی کرد. به این منظور، در تابع هدف تفاوت فشارهای گرهی با فشارهای آزمون در تمامی ساعتها باید به‌طور همزمان کمینه شود. به‌طور کلی هرچه

افزایش می‌یابد. در این تحقیق برای انتخاب گره‌های آزمون، تحلیل حساسیت انجام شد. حساسیت کل گره‌های شبکه به تغییر در ضریب زبری هر یک از لوله‌ها به روش تفاضل‌های محدود محاسبه شده است. گره‌ای با حساسیت بالا انتخاب اول به‌عنوان گره آزمون است، اما مجموعه گره‌های آزمون نهایی با توجه به توزیع متعارف آنها در شبکه و قابلیت دسترسی به آنها برای ثبت فشار انتخاب می‌شوند. مراحل انجام تحلیل حساسیت به شرح زیر است:

(۱) ابتدا برای تمامی لوله‌ها بر اساس قضاوت مهندسی مقدار اولیه زبری (C_i) تخمین زده می‌شود. (۲) به‌ازای مقادیر اولیه زبری، مدل تحلیل شده و مقدار اولیه فشار (P_j) در گره‌ها به‌دست می‌آید. (۳) به مقدار اولیه زبری لوله اول، مقدار ΔC اضافه شده و مدل دوباره تحلیل می‌شود. از آنجا که با تغییر زبری یکی از لوله‌ها تمامی فشارها دستخوش تغییر می‌شوند، فشارهای ناشی از زبری جدید در تمامی گره‌ها باید به‌دست آید. (۴) مرحله قبلی با تغییر ضریب زبری لوله دوم تکرار می‌شود، در حالی که لوله اول و سایر لوله‌ها با زبری اولیه خود به محاسبات وارد می‌شوند. این کار تا آخرین لوله شبکه ادامه می‌یابد. (۵) حساسیت فشار هر یک از گره‌ها (تعداد گره‌ها $j=1:Nn$) نسبت به تغییر هر یک از پارامترهای مجهول بهینه‌سازی (تعداد لوله‌ها $i=1:NP$) از رابطه (۴) و حساسیت کلی هر گره نسبت به تغییر کل پارامترهای بهینه‌سازی از رابطه (۵) محاسبه می‌شود. مسیرهایی که بر اساس حداکثر گرادیان تابع هدف نسبت به پارامترهای بهینه‌سازی انتخاب می‌شوند، بهترین جواب را در پی دارند:

$$\frac{\partial P_j}{\partial C_i} = \frac{P_j(C_i + \Delta C) - P_j(C_i)}{\Delta C_i} \quad (4)$$

ضعف نوسانهای ساعتی در شهرها بستگی به بزرگی شهر و برنامه روزانه اکثریت مردم دارد. با بزرگ شدن شهر ناهماهنگی در برنامه زندگی مردم بیشتر شده و نوسانهای ساعتی کمتر می شود.

جدول ۲ مشخصات لوله های موجود در شبکه

| شاخه i-j | قطر mm | ضرایب زبری مفروض | طول لوله m |
|-------------|-----------|---------------------|---------------|
| ۱ ۲ | ۳۰۰ | ۹۷ | ۱۵۰۰ |
| ۲ ۳ | ۲۰۰ | ۹۳ | ۱۰۰۰ |
| ۲ ۴ | ۲۵۰ | ۹۵ | ۱۰۰۰ |
| ۴ ۵ | ۲۰۰ | ۹۳ | ۱۰۰۰ |
| ۳ ۵ | ۱۵۰ | ۹۰ | ۱۰۰۰ |
| ۴ ۶ | ۱۵۰ | ۹۰ | ۱۰۰۰ |
| ۶ ۷ | ۱۰۰ | ۸۷ | ۱۰۰۰ |
| ۵ ۷ | ۸۰ | ۸۵ | ۱۰۰۰ |

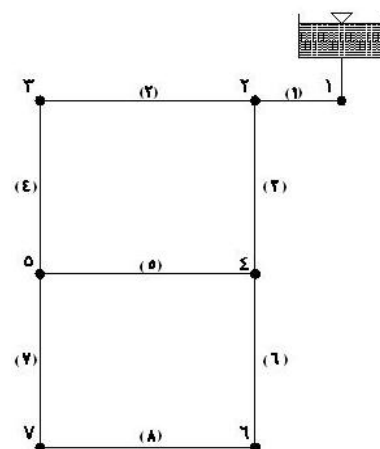
جدول ۳ رقوم گره های شبکه

| شماره گره | تراز گره (m) |
|-----------|-----------------|
| ۱ | ۵۰ |
| ۲ | ۱۵۰ |
| ۳ | ۱۶۰ |
| ۴ | ۱۵۰ |
| ۵ | ۱۶۵ |
| ۶ | ۱۶۰ |
| ۷ | ۱۶۰ |

فشار پیزومتریک گره ۱ (مخزن) = ۱۰۰ متر

مصرف آب تهران در بعد از ظهر از ساعت ۲ تا ۴ به بیشینه خود و در ساعتهای پس از نیمه شب به حداقل می رسد. برای تعیین ضرایب مصارف ساعتی نمودارهایی با توجه به جمعیت شهر و بزرگی آن در دست است

اطلاعات بیشتری از خط لوله در دست باشد، اطمینان از یک به یک بودن جوابها بیشتر است. تکرار آزمایش در ساعتهای مختلف، با آرایش متفاوتی از مصارف و ترکیب های مختلفی از دبی در خطوط لوله، قضاوت در باره یکتایی نتایج را ساده تر می سازد. در شبکه ارایه شده در شکل ۱، تمامی روشهای یاد شده به صورت گام به گام به کار برده شده است.



شکل ۱ شبکه توزیع آب مربوط به مثال

گام اول معرفی مشخصات شبکه به مدل تحلیل هیدرولیکی است، این مشخصات در جدولهای ۲ و ۳ داده شده است.

گام دوم گردآوری اطلاعات عمومی شهر و ضریب α برای محاسبه مصرف عادی در هر گره در ساعت انجام آزمایش است. با استفاده از این اطلاعات می توان دبی متوسط روزانه و با داشتن ضریب α می توان مقدار مصرف عادی را در هر گره از شبکه در ساعت آزمون به دست آورد. در ۲۴ ساعت شبانه روز مقدار مصرف آب در شهر تغییر می کند و شبکه لوله کشی را با توجه به مقدار بیشینه آن محاسبه و طراحی می کنند. شدت و

جدول ۴ مصارف متوسط روزانه و نرمال گره‌های شبکه، در ساعت آزمون ۱۴ (حداکثر مصرف)

| شماره گره | مصرف نرمال در ساعت حداکثر مصرف (lit/s) | دبی متوسط روزانه (lit/s) |
|-----------|---|-----------------------------|
| ۱ | ۲۵/۸۷۵ | ۲۵۸/۷۵ |
| ۲ | ۳ | ۳۰ |
| ۳ | ۳ | ۳۰ |
| ۴ | ۳/۷۵ | ۳۷/۵ |
| ۵ | ۳/۷۵ | ۳۷/۵ |
| ۶ | ۸/۵ | ۸۲/۵ |
| ۷ | ۴/۱۲۵ | ۴۱/۲۵ |

در گام چهارم و آخر پس از گردآوری اطلاعات مورد نظر، مدل هیدرولیکی شبکه برای تحلیل با استفاده از نرم‌افزار NET_QC آماده‌سازی می‌شود.

سپس با تشکیل فایل‌های مورد نیاز و انجام تنظیمات در برنامه GA، حل مسأله معکوس آغاز می‌شود. ابتدا جمعیت اولیه‌ای از کروموزومها (مجموعه زبریهای موجود) تولید شده و سپس در طی فرایند تکاملی تدریجی و تصادفی کروموزومهای اولیه با هدف کاهش مقدار تابع هزینه، تنظیم می‌شوند. این منجر به تولید نسل‌های بعدی می‌شود و این روند تا رسیدن به همگرایی مناسب ادامه می‌یابد. در نهایت بهترین کروموزوم در آخرین نسل، مجموعه ضریب زبری موجود در شبکه را در ساعت آزمون نشان می‌دهد که مطابق با فشارهای اندازه‌گیری شده در گره‌های آزمون است. توابع هدف مورد استفاده به صورت زیر است:

$$Fitness = \left(\sum_{i=1}^{mn} (P - P') \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{mp} (Q - Q') \right)^2$$

$$Fitness = \sum_{i=1}^{LC} \sum_{i=1}^{mn} (P - P')^2$$

(منزوی، ۱۳۷۸). اما این نمودارها بیشتر جنبه عمومی داشته و در واسنجی، در عمل باید با آمارگیری از مصارف شبکه در شبانه‌روز و تحلیل‌های آماری، ضرایب مربوط را در هر ساعت از شبانه‌روز برای شبکه مورد نظر به دست آورد.

در صورتی که مصرف عادی برای تمامی ساعت‌های شبانه‌روز در گره‌های شبکه در نظر گرفته شود، جریان حاصل، از نظر هیدرولیکی جریان ماندگار^۱ نامیده می‌شود. اما در صورتی که مصارف ساعتی (۲۴ ساعته) برای گره‌های شبکه در نظر گرفته شود و شبکه به صورت گام‌هایی زمانی با مصارف متفاوت تحلیل شود، جریان حاصل جریان شبه ماندگار^۲ نامیده می‌شود. در این نوع جریان، دبی مصرفی در هر گام زمانی متفاوت است، اما در هر گام زمانی مشخص، شبکه به صورت ماندگار و با فرض دبی ثابت در کل ساعت آزمون تحلیل می‌شود. مزیت جریان شبه‌ماندگار دقت بیشتر آن است و لذا اطمینان نسبت به جوابهای حاصل از واسنجی زبری در شبکه‌ای که به صورت شبه‌ماندگار تحلیل شده از نظر یکتایی و دقت بیشتر است. در این مثال واسنجی شبکه در یک روز در چند ساعت مختلف آزمون انجام می‌شود. مصارف عادی ساعتی برای چند ساعت در شبانه‌روز مانند ساعت‌های حداکثر و متوسط مصرف روزانه، در گره‌های شبکه محاسبه شده است (جدول ۴).

گام سوم انتخاب گره‌های آزمون است. با توجه به توضیحات بالا در باره انتخاب گره‌های آزمون و انجام محاسبات، در پایان سه گره [3,6,7] به عنوان گره‌های آزمون شبکه انتخاب می‌شوند. از گره‌های با حساسیت کم می‌توان برای بررسی درستی نتایج حاصل از بهینه‌یابی استفاده کرد.

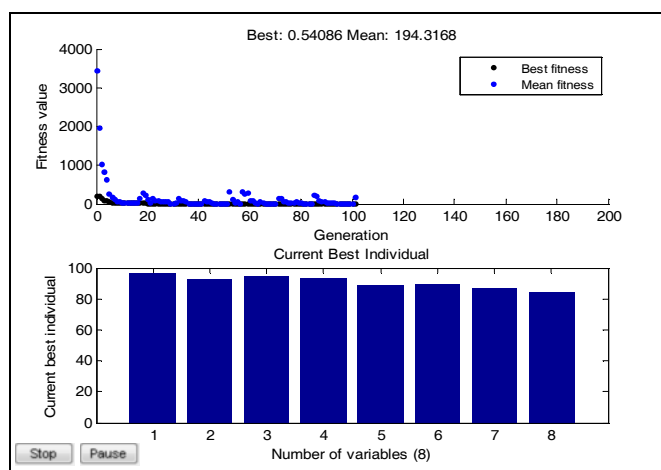
1. Steady state flow
2. Quasi steady flow

آوردن هر یک از ستونهای جدول ۵، مدل مسأله معکوس حداقل ۲۰ بار اجرا شده است. دلیل این کار آن است که در هر بار از اجرای الگوریتم، جمعیت اولیه به طور اتفاقی تولید می‌شود و لذا الگوریتم با طی کردن دقیق همان مراحل قبلی به جواب نمی‌رسد و در نتیجه جوابهای حاصل از هر اجرا، تفاوتی جزئی دارند. با توجه به این که قصد مقایسه و تصمیم‌گیری در باره این روشها است، متوسط ۲۰ جواب، تصمیم‌گیری را منطقی‌تر می‌سازد.

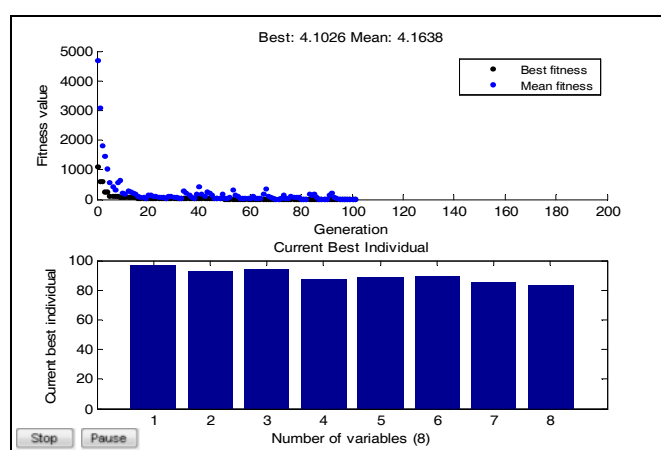
P فشار محاسبه شده، P' فشار اندازه‌گیری شده، Q دبی محاسبه شده، Q' دبی اندازه‌گیری شده، mn تعداد گره‌های آزمون، mp تعداد لوله‌های آزمون، LC تعداد ساعتی آزمون

۴- نتایج

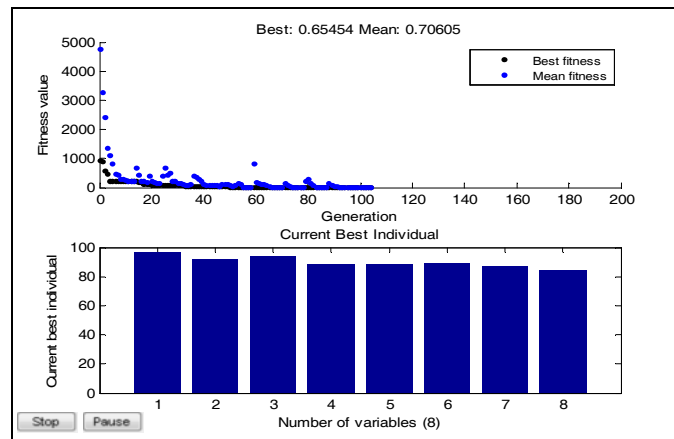
نمودارهای ۱ تا ۴ روند تکامل پارامترهای زبری را در طی بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و رسیدن به همگرایی مورد نظر و مقادیر این پارامترها را نشان می‌دهد. برای به دست



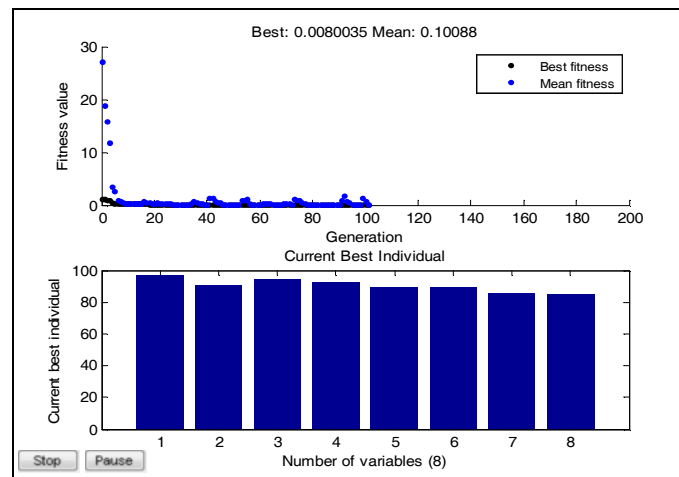
نمودار ۱ یک ساعت آزمون (حداکثر مصرف) و تابع هدف شامل تفاوتی فشار و دبی مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده



نمودار ۲ ۳ ساعت آزمون، تابع هدف شامل تفاوتی فشار مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده



نمودار ۳ ۶ ساعت آزمون و تابع هدف شامل تفاوت‌های فشار مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده



نمودار ۴ ۲۴ ساعت آزمون و تابع هدف شامل تفاوت‌های فشار مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده

درصد انحراف جوابهای این روش بر زبری‌های شبکه اعمال شده و سپس شبکه با مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی تحلیل شده و فشارهای حاصل از این تغییر در جداول ثبت شده است. در جدول ۶ لوله‌ای که تغییر زبری برای آن انجام شده به صورت اتفاقی انتخاب شده است. بدیهی است که به علت گذر عمر لوله و افزایش زبری، تغییر مقادیر زبری در برای کاهش مقدار عددی C (افزایش زبری) است.

همان‌طور که در جدول ۵ دیده می‌شود، در هیچ یک از موارد اجرا شده توسط مدل معکوس، تفاوت با زبریهای اولیه بیشتر از ۲۰٪ در یکی از لوله‌ها یا ۵٪ در کل لوله‌ها نبوده است. با توجه به حساسیت ناچیز فشارها در گره‌ها نسبت به این درصد از تغییر زبری (جدول‌های ۶ و ۷)، این مقدار انحراف قابل صرف‌نظر بوده و لذا نتایج قابل استناد است. همان‌طور که گفته شد جدول‌های ۶ و ۷ به‌منظور نمایش ناچیز بودن حساسیت فشار به الگوریتم خطای حاصل از این روش تهیه شده است. کمی بیشتر از

جدول ۵ ضرایب زبری موجود در شبکه در ساعت آزمون پس از تحلیل مسأله معکوس

| مقادیر اولیه | واسنجی در ۲۴ ساعت | واسنجی در ۶ ساعت | واسنجی در ۳ ساعت | واسنجی در ساعت اوج مصرف با منظور کردن دبی و فشار | شماره لوله |
|--------------|-------------------|------------------|------------------|--|------------|
| ۹۷ | ۹۷ | ۹۶ | ۹۷ | ۹۴ | ۱ |
| ۹۳ | ۹۲ | ۹۳ | ۹۰ | ۹۳ | ۲ |
| ۹۵ | ۹۳ | ۹۵ | ۹۵ | ۹۵ | ۳ |
| ۹۳ | ۹۳ | ۹۱ | ۹۳ | ۸۰ | ۴ |
| ۹۰ | ۸۸ | ۸۵ | ۹۰ | ۷۲ | ۵ |
| ۹۰ | ۹۱ | ۹۲ | ۹۲ | ۹۲ | ۶ |
| ۸۷ | ۸۷ | ۸۷ | ۸۷ | ۸۷ | ۷ |
| ۸۵ | ۸۵ | ۸۳ | ۸۴ | ۸۵ | ۸ |
| | ٪۲ | ٪۶ | ٪۳ | ٪۲۰ | حداکثر خطا |
| | ٪۱ | ٪۳ | ٪۲ | ٪۴ | متوسط خطا |

جدول ۶ تغییر فشارگره‌ها نسبت به تغییر زبری لوله در شبکه شکل ۱

| | تغییر ۳۰٪ در زبری یکی از لوله‌ها | تغییر ۲۰٪ در زبری یکی از لوله‌ها | تغییر ۱۰٪ در زبری یکی از لوله‌ها |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| تغییر در فشار گره ۱ (Kp) | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| تغییر در فشار گره ۲ (Kp) | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| تغییر در فشار گره ۳ (Kp) | -۰/۶۶ | -۰/۴۲ | ۰/۰۲ |
| تغییر در فشار گره ۴ (Kp) | ۰/۵۵ | ۰/۳۴ | -۰/۰۲ |
| تغییر در فشار گره ۵ (Kp) | ۰/۸۴ | ۰/۵۱ | -۰/۰۶ |
| تغییر در فشار گره ۶ (Kp) | ۰/۵۸ | ۰/۳۶ | -۰/۰۱ |
| تغییر در فشار گره ۷ (Kp) | ۰/۶۴ | ۰/۳۹ | ۰/۰۱ |

جدول ۷ تغییر فشارگره‌ها نسبت به تغییر زبری تمامی لوله‌ها در شبکه شکل ۱

| | تغییر ۵٪ در زبری همه لوله‌ها |
|-------------------------|------------------------------|
| تغییر در فشار گره ۱ (٪) | ۰/۰۰ |
| تغییر در فشار گره ۲ (٪) | ۰/۵۲ |
| تغییر در فشار گره ۳ (٪) | ۰/۷۹ |
| تغییر در فشار گره ۴ (٪) | ۰/۷۱ |
| تغییر در فشار گره ۵ (٪) | ۱/۰۶ |
| تغییر در فشار گره ۶ (٪) | ۲/۱۱ |
| تغییر در فشار گره ۷ (٪) | ۲/۶۴ |

۵- نتیجه گیری

- با توجه به تحلیل حساسیت الگوریتم ژنتیک در این تحقیق (جدول ۸) علاوه بر سایر ویژگیها، دو مورد مهم تر برای هر الگوریتم ژنتیک - که جزو عوامل مؤثر بر همگرایی سریع و عدم گمراهی الگوریتم در یافتن بهینه مطلق است - برای واسنجی زبری شبکه‌ها معرفی شد. این دو ویژگی عبارت است از تعداد جمعیت اولیه و درصد جهش ژنی. تعداد ۵۰ برای جمعیت اولیه و مقدار ۰.۲٪ برای جهش، مقادیر بهینه هستند.

- رعایت کردن کلیدی‌ترین عواملی که برای یک به یک شدن جوابهای مدل معکوس اهمیت دارند، یعنی: (۱) گروه گره‌های آزمون از حساسیت نسبی بالایی نسبت به مجهولات برخوردار باشند و (۲) تمامی لوله‌ها با دبی قابل توجهی روبه‌رو باشند (ساعاتی بالای مصرف) درصد بالایی از اطمینان را نسبت به‌روش به‌کار گرفته شده ایجاد کرده است.

- همان‌طور که در جدول ۵ دیده می‌شود، واسنجی در سه ساعت آزمون به‌وسیله تابع هدف، شامل تفاوت‌های فشار مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده، با توجه به دقت مناسب و شباهت نتایج آن با انواع ۶ گامی و ۲۴ گامی و کمتر بودن میزان محاسبات و تعداد اندازه‌گیریهای میدانی بر نوع ۲۴ گامی یا ۶ گامی برای واسنجی برتری دارد.

- در هیچ یک از موارد اجرا شده توسط مدل معکوس، تفاوت با زبریهای اولیه بیشتر از ۰.۲٪ در یکی از لوله‌ها یا ۰.۵٪ در کل لوله‌ها نبود. این مقدار خطا (جدول ۵) باعث تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقادیر فشار نمی‌شود (جدول‌های ۶ و ۷). تغییر مقادیر دبی در لوله نسبت به تغییر در زبری لوله‌ها نیز محاسبه شد و تفاوت بسیار ناچیزی (۰/۰۰۰۰۱ متر مکعب در ثانیه) ملاحظه شد.

جدول ۸ حساسیت زبری لوله‌ها نسبت به تغییر در مشخصه‌های GA

| شماره لوله | Pop. Size: 15 | Pop. Size: 20 | Pop. Size: 30 | Pop. Size: 50 | Mut. Ratio: 2% | Mut. Ratio: 5% | Mut. Ratio: 10% | Cross.: Scattered | Cross.: Single point | Cross.: Two point |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| ۱ | ۹۶ | ۹۵ | ۹۱ | ۹۷ | ۹۷ | ۹۷ | ۹۶ | ۹۷ | ۹۶ | ۹۷ |
| ۲ | ۸۹ | ۹۱ | ۹۱ | ۹۳ | ۹۲ | ۹۳ | ۸۷ | ۹۲ | ۸۸ | ۸۴ |
| ۳ | ۸۸ | ۹۳ | ۹۴ | ۹۳ | ۹۱ | ۹۳ | ۹۵ | ۹۱ | ۹۳ | ۹۳ |
| ۴ | ۸۳ | ۸۰ | ۸۵ | ۸۴ | ۹۳ | ۸۴ | ۹۲ | ۹۳ | ۸۳ | ۹۳ |
| ۵ | ۸۶ | ۸۲ | ۸۸ | ۹۰ | ۸۹ | ۹۰ | ۹۰ | ۸۹ | ۸۹ | ۸۵ |
| ۶ | ۸۹ | ۹۰ | ۸۹ | ۹۰ | ۸۹ | ۹۰ | ۹۰ | ۸۹ | ۹۰ | ۹۰ |
| ۷ | ۸۴ | ۸۴ | ۸۷ | ۸۷ | ۸۸ | ۸۷ | ۸۶ | ۸۸ | ۸۵ | ۸۴ |
| ۸ | ۸۳ | ۸۵ | ۸۳ | ۸۳ | ۸۴ | ۸۳ | ۸۳ | ۸۴ | ۸۵ | ۸۵ |
| Mean error | ٪۴/۲۵ | ٪۴ | ٪۳ | ٪۱/۵۰ | ٪۱/۱۲ | ٪۱/۵۰ | ٪۱/۲۵ | ٪۱/۱۲ | ٪۳ | ٪۲/۸۷ |
| Best fitness | ۲۷/۲۲ | ۷/۱۹ | ۳۶/۷ | ۴/۳۲ | ۰/۲۶ | ۴/۳۴ | ۶/۱۸ | ۰/۲۶ | ۶/۴۱ | ۴/۶۵ |

ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ص. ۲۲۱.

۲- حقیقی، علی. (۱۳۸۳). ردیابی نشت در شبکه‌های توزیع و خطوط انتقال آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ض. ۲۹۷.

۳- منزوی، م. (۱۳۷۸). آبرسانی شهری. انتشارات دانشگاه تهران، ص. ۳۷۷.

Borzi, A. and Gerbino, E. (1998). "Genetic Algorithms for water distribution network calibration: A real application".

deSchaetzen, W. (2000). "Optimal calibration and sampling design for hydraulic network models", PhD Thesis, School of Engineering and Computer Science, University of Exeter.

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

Halhal, D., Walters, G.A., Ouazar, D. and Savic, D.A. (1997). "Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 123(3), pp. 137-146.

Kapelan, Z.S., Savic, D.A. and Walters, G.A. (2002). "Hybrid GA for calibration of water distribution system hydraulic models", Proc. 1st Annual Environmental & Water Resources Systems Analysis (EWRSA) Symposium, Roanoke, Virginia, USA.

Reddy, P.V.N., Sridharan, K. and Rao, P.V. (1996). "WLS method for parameter estimation in water distribution networks", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 122(3), pp. 157-164.

Samani, H.M.V. and Naeni, S.T. (1996). "Optimization of water distribution networks." Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 34, 5, PP. 623-632.

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.

- در نتیجه گیری کلی می توان چنین اضافه کرد: با توجه به دقت کافی زبریهای به دست آمده در این تحقیق، ضریب زبری لوله های یک شبکه در دست بهره برداری به کمک اندازه گیری مقادیر فشار در تعدادی از نقاط شاهد در چند ساعت از شبانه روز محاسبه شد و با تعریف تابع هدفی با معیار کمینه سازی مربع اختلاف مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر محاسباتی فشار در نقاط شاهد و سپس حل آن با استفاده از روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک به صورت معکوس قابل تخمین است.

۶- فهرست علائم

| | |
|----------------|---|
| α | ضریب مصرف عادی |
| SS_j | حساسیت کلی یا جمع حساسیتهای هر گره نسبت به تغییر زبری هر لوله |
| C | ضریب هیزن ویلیامز و دبی مصرف در گره ها |
| H | ارتفاع پیزومتریک در گره ها |
| LC | تعداد ساعتهای آزمون |
| mn | تعداد گره های آزمون |
| mp | تعداد لوله های آزمون |
| $No_ntest(i)$ | شماره موقعیت گره آزمون در شبکه |
| $ntest$ | تعداد گره های آزمون |
| P | فشار محاسبه شده |
| P' | فشار اندازه گیری شده یا مشاهده شده |
| Q | دبی محاسبه شده |
| Q' | دبی اندازه گیری شده |
| Q_{ij} | دبی عبوری از گره i به طرف گره j |

۷- منابع

۱- جلیلی، ع. (۱۳۸۰). بررسی ساختگاه گدازنده به روش آنالیز معکوس داده های حاصل از ابزار دقیق، پایان نامه کارشناسی

Optimisation Applications, Exeter, UK, D. A. Savic and G. A. Walters, eds., vol.1, pp. 327-336.

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

Tan , S.M., Fox, C. Physics 707 Inverse Problems. The university of Auckland.

Todini, E. (1999). "Using a Kalman filter approach for looped water distribution network calibration", Proc. Water Industry Systems: Modelling and