

مقایسه‌ی کارایی روش آنیلینگ با سایر روش‌های تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های تحت فشار

سحرالسادات رضویان^۱، سیدمعزالدین نبوی‌همدانی^۲ و حسین بابازاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۰۵

چکیده

تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آب شامل تعیین مقادیر دبی توزیع‌شده در هر لوله و هد در گره‌های شبکه می‌باشد. امروزه استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری آنیلینگ شبیه‌سازی شده در حل مسائل پیچیده‌ی مهندسی با توجه به قابلیت‌های آن رو به افزایش نهاده است. هدف از انجام این تحقیق تحلیل هیدرولیکی شبکه‌ی توزیع آب براساس آنیلینگ شبیه‌سازی شده و مقایسه نتایج حاصل از آن براساس شاخص‌های آماری: میانگین خطا و مجذور میانگین مربع خطا با روش‌های عددی: هاردی کراس، نیوتن-رافسون، نظریه خطی، گرادیان و نرم‌افزار Epanet می‌باشد. جهت تعیین توانایی انواع روش‌ها در ارضای هم‌زمان معادلات پیوستگی و افت انرژی شبکه، از تابع هدف بهره برده می‌شود. در پایان مقدار تابع هدف آنیلینگ برای شبکه‌ی دو حلقه‌ای مورد نظر برابر ۰/۰۰۰۱۶ گردید و بررسی نتایج شاخص‌ها بیانگر دقت آن در رسیدن به جواب‌های مسئله بود. این نتایج کارایی این روش را نسبت به سایر روش‌های متداول اثبات می‌نماید. بر اساس این ارزیابی می‌توان آنیلینگ شبیه‌سازی شده را روشی جدید و قابل اطمینان در طراحی و تحلیل شبکه‌های آب تحت فشار توصیه نمود.

واژه‌های کلیدی: تابع هدف، تحلیل هیدرولیکی، روش‌های عددی، شاخص‌های آماری و معادلات شبکه جریان.

^۱ کارشناسی مهندسی آب، دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران _ همدان، شکریه، کوچه شهید بهمنی، کوچه عارف، ۰۹۱۸۳۰۹۸۱۱۰، irrigation_razavian@yahoo.com (مسئول مکاتبه)

^۲ کارشناسی مهندسی آب، دانشجوی کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران _ همدان، شکریه، کوچه شهید بهمنی، کوچه عارف ۰۹۱۹۰۹۱۸۱۱۰، ed_nabavi@ahoo.com

^۳ دانشیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، ۰۹۱۲۶۹۹۰۱۰۵، h_babazad@hotmaill.com

مقدمه

تغییرات مصرف در شبکه‌ها تحت تأثیر نوسانات لحظه‌ای، روزانه، هفتگی، ماهانه و فصلی می‌باشد، بنابراین در ارتفاع پیزومتریک و دبی لوله‌ها تغییرات پیوسته‌ای ایجاد می‌شود و لذا جریان ورودی و خروجی گره‌ها نیز ثابت نبوده و با زمان تغییر می‌نماید. اما در عمل معمولاً شبکه‌ها را در حالت ماندگار تحلیل می‌کنند، که در آن مصرف گره‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود. تحلیل در حالت ماندگار^۱ را تحلیل استاتیکی^۲ می‌نامند. در حالی که در تحلیل دینامیکی^۳، نوسانات زمانی مصرف بررسی می‌شوند. میزان جریان ورودی به شبکه به میزان مصرف بستگی دارد. در تحلیل استاتیکی میزان مصرف در طول زمان ثابت در نظر گرفته می‌شود و میزان آبرسانی به شبکه ماندگار می‌باشد. مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه‌ها، ابزار توانمندی هستند که برای تعیین مشخصات هیدرولیکی سیستم توزیع آب نظیر فشار در گره‌ها، توزیع جریان در لوله و ... به کار می‌روند (تائبی و چمنی، ۱۳۸۴). آنالیز شبکه‌ی توزیع آب شامل: تعیین مقادیر دبی توزیع شده در هر لوله و ارتفاع پیزومتریک در گره‌های شبکه است. به طوری که روابط پیوستگی جریان در گره‌ها و افت انرژی در حلقه‌ها را ارضاء نمایند. پس از نوشتن معادلات فوق در هر شبکه، تمام یا برخی از معادلات به صورت غیرخطی ظاهر می‌گردند، که هیچ روش مستقیمی برای حل آن‌ها وجود ندارد. لذا باید از روش‌های تکراری برای حل این مجموعه معادلات استفاده کرد. بدیهی است در هر تکرار، حل معادلات تقریبی است و نیاز به تصحیح دارند. از این رو تکرار محاسبات تا رسیدن به دقت مطلوب ادامه خواهد یافت. چهار روش تکراری مرسوم برای حل معادلات و در نتیجه تحلیل شبکه‌های آب تحت فشار وجود دارند که به ترتیب زمان ارائه عبارتند از:

- روش هاردی کراس^۴
 - روش نیوتن-رافسون^۵
 - روش نظریه‌ی خطی^۶
 - روش گرادیان^۷ (Lindell and Ormsbee, 2006).
- هاردی کراس، در سال ۱۹۳۶ میلادی روشی تکراری برای تحلیل شبکه‌های حلقوی توزیع آب با جریانات ورودی و خروجی مشخص پیشنهاد نمود (بابازاده و بهشتی، ۱۳۸۹). در این روش معادلات پیوستگی جریان و افت فشار، با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌ای حل می‌شوند. اما مشکل عمده آن مربوط به چگونگی همگرایی محاسبات می‌باشد. همگرایی این روش بسیار کند بوده و منجر به تکرار زیاد مراحل محاسباتی شده و تعداد تکرار محاسبات با بزرگ‌تر شدن اندازه شبکه افزایش می‌یابد. در برخی از حالات نیز ممکن است محاسبات واگرا شده و مطلقاً همگرایی رخ ندهد (Bhave and Gupta, 2006).
- روش نیوتن-رافسون یک روش عددی قدرتمند برای حل سیستم معادلات غیرخطی است. در این روش جملات غیرخطی در سری تیلور بسط داده شده و فقط جملات خطی حفظ می‌شوند، در واقع معادلات غیرخطی را از طریق مشتق‌گیری جزئی خطی می‌کند و معادلات به طور هم‌زمان حل می‌شوند (بابازاده و بهشتی، ۱۳۸۹ و تائبی و چمنی، ۱۳۸۴). اولین بار در سال ۱۹۶۳ روش نیوتن رافسون در تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی توسط مارتین و پیترز استفاده شد و معایب آن در عدم همگرایی مطلوب در شبکه‌های بزرگ و نوسانات زیاد آن تا رسیدن به همگرایی مناسب مشخص گردید. این روش بسیار حساس بوده و در صورت عدم کنترل با خروج از چرخه‌های تکرارهای همگرا عملاً واگرا شده و در هر تکرار با گام بلندتری از جواب فاصله می‌گیرد (تابش و واسطی، ۱۳۸۸).

⁴ Hardy Cross

⁵ Newton-Raphson

⁶ Linear Theory Method

⁷ Gradient Method

¹ Steady State

² Static Analysis

³ Dynamic Analysis

حاکم بر شبکه با بهره‌گیری از جبر ماتریس‌ها (توابع بازگشتی متشکل از ماتریس ضرایب اصلی) و خطی نمودن فرمول غیرخطی افت هد با استفاده از بسط سری تیلور، می‌پردازد (Ahmad, 1997). این روش سرعت همگرایی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد، به علاوه تا حدودی نیز از حدس اولیه مستقل است. در حال حاضر از این الگوریتم در تحلیل شبکه‌های آبرسانی به خصوص در نرم افزارهای EPANET و WaterGems استفاده می‌شود (Luenberger, 2008).

مدل Epanet

نرم‌افزار Epanet توسط اداره تأمین و منابع آب سازمان محیط زیست آمریکا^۱ (EPA)، در قالب یک مدل شبیه‌ساز کامپیوتری جهت تعیین و پیش بینی رفتارهای دینامیکی و انتقال کیفیتی آب در بازه‌های گسترده‌ی زمانی در سیستم توزیع آب آشامیدنی، ارائه شده است. Epanet با بهره‌گیری از روش گرادیان در حل معادلات شبکه، مدلی کامل جهت طراحی شبکه‌های آب تحت فشار به صورت درخت یا حلقوی می‌باشد. شبکه‌های توزیع آب از لوله‌ها، گره‌ها (نقاط اتصال لوله‌ها)، پمپ‌ها، شیرها و مخازن آب جهت ذخیره‌سازی تشکیل شده است (Mays, 1999). موارد زیر با استفاده از این مدل قابل انجام می‌باشد:

- ۱- جریان آب را در هر لوله دنبال می‌کند.
- ۲- فشار در هر گره را محاسبه می‌نماید.
- ۳- ارتفاع آب در هر تانک را محاسبه می‌نماید.
- ۴- محاسبه غلظت عناصر شیمیایی در کل شبکه و در طول دوره شبیه‌سازی می‌پردازد (Mays, 1999).

الگوریتم فرا ابتکاری^۲ آنیلینگ شبیه سازی شده

الگوریتم آنیلینگ شبیه‌سازی شده^۳ یا شبیه‌سازی حرارتی، یکی از مجموعه الگوریتم‌های فرا ابتکاری معروف در زمینه الگوریتم‌های هوش مصنوعی است.

روش نظریه خطی توسط وود و چارلز در سال ۱۹۷۲ مطرح گردید. در این روش تمام حلقه‌های شبکه با هم مورد تحلیل قرار می‌گیرند و همانند روش نیوتن-رافسون روابط پیوستگی جریان در گره‌ها خطی و روابط افت فشار در حلقه‌ها غیرخطی می‌باشد. روش نیوتن-رافسون معادلات غیرخطی از طریق مشتق‌گیری جزئی خطی می‌کند، در صورتی که روش نظریه خطی معادلات غیر خطی را با ادغام قسمت غیر خطی آن‌ها در ثابت مقاومت لوله‌ها خطی می‌کند (تائبی و چمنی، ۱۳۸۴). این فرآیند تا زمانی ادامه می‌یابد که جواب‌های به دست آمده به محدوده‌های مجاز نزدیک شوند (بابازاده و بهشتی، ۱۳۸۹) عیب عمده این روش نوساناتی است که در پیرامون جواب نهایی به وجود می‌آید (Wood et al., 1972).

امروزه با توجه به پیشرفت روزافزون رایانه، روش‌های نیوتن-رافسون و نظریه خطی به دلیل دارا بودن تعداد تکرار عملیات محاسباتی کمتر و سرعت همگرایی بالاتر، مورد توجه قرار گرفته‌اند (بابازاده و بهشتی، ۱۳۸۹). با این وجود مشکلات همگرایی حل مسئله گاهاً در تحلیل این شبکه‌ها مشکل‌ساز است. همچنین استفاده از این روش‌ها باعث ایجاد تقریب در حل معادلات می‌گردد.

هم‌اکنون یکی از بهترین روش‌های تکرار که در حل دستگاه‌های غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش بهبود یافته‌ی نیوتن-رافسون، موسوم به گرادیان است. در این روش به جای اصلاح مداوم Q و H ، این مقادیر به طور مستقیم در روندی تکراری محاسبه می‌شوند. این محاسبات تا هنگامی که جواب‌های نهایی به صورت ثابت ظاهر گردند و اختلافی بین آن‌ها مشاهده نشود، ادامه می‌یابد و نتایج به طور هم‌زمان ارائه می‌شوند. همچنین این روش برای شروع محاسبات مانند روش نظریه خطی نیازی به رعایت شرط پیوستگی دبی در گره‌ها ندارد (Todini et al., 1987). این روش معادلات انرژی در هر لوله را با ترکیب معادلات پیوستگی در هر نقطه‌ی اتصال، به‌منظور حل هم‌زمان معادلات افت گره و دبی لوله‌ها نوشته، سپس به حل هم‌زمان روابط هیدرولیکی

¹ Environmental Protection Agency

² Metaheuristic

³ Simulated Annealing

(Lin and Yen, 2008) به منظور بررسی جریان سه بعدی آب زیرزمینی و بهینه‌سازی عوامل مربوط به پمپاژ از قبیل محل پمپاژ، مدت زمان پمپاژ و سرعت پمپاژ به ترکیب روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده و نرم‌افزار MODFLOW پرداختند. روش آن‌ها که به SA-MF موسوم گردید، با بررسی ۸ حالت در سفره‌های همگن و ناهمگن توانست به خوبی در ابتدا توسط آنیلینگ شبیه‌سازی شده محل پمپاژ را مشخص نماید و سپس توسط MODFLOW مدت زمان و سرعت پمپاژ را تعیین گرداند.

Mohammadi et al., 2013 به بهره‌گیری از روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده در تعیین ابعاد قسمت‌های مختلف سد خاکی حصار سنگی بیرجند پرداختند. پایین آوردن میزان مصالح به کار رفته در هسته رسی سد و جلوگیری هم‌زمان از پدیده نشت از بدنه به عنوان اهداف تحقیق منظور گردیدند. توانایی آنیلینگ شبیه‌سازی شده در تعیین پارامترهایی مانند نشت از بدنه سد، گرادیان هیدرولیکی و ضریب ایمنی در مقایسه با مقادیر واقعی نشان‌دهنده توانایی خوب آنیلینگ است. همچنین کاهش حجم مواد برای ساخت و ساز هسته و پوسته سد حدود ۲۱ و ۸ درصد به دست آمدند. این نتایج نشان می‌دهد یک طرح مطلوب عمومی طراحی ابعاد هسته رسی در وضعیت پایدار توسط روش آنیلینگ به دست می‌آید.

Sousa et al., 2015 در بررسی چالش‌های پیشروی شرکت‌های مهندسی آب از یک مدل شبیه ساز هیدرولیکی با روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده بهره جستند. آن‌ها در کنترل هدر رفت آب و بهره‌وری انرژی که موجب ارائه خدمات با قیمت بالا و از دست دادن سود می‌شود و هزینه‌های پمپاژ مشترکین را بالا می‌برد، توانستند به شناسایی اندازه و مکان لوله‌های طرح و نیز کنترل پمپ و تنظیمات آن بپردازند. بهره‌گیری از آنیلینگ شبیه‌سازی شده در طرح شبکه توزیع آب تحت فشار مورد بررسی ایشان منجر به ارائه‌ی مجموعه‌ای از راه‌حل‌های خوب از نظر هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای، با یک سازگاری

این الگوریتم در سال ۱۹۸۳ و توسط اسکات کرک پاتریک ودانیل جلت ابداع شده است. اصولاً اکثر الگوریتم‌های فرا ابتکاری با الگوگیری و شبیه‌سازی یکی از قوانین یا روابط موجود در طبیعت بنا نهاده می‌شوند. این الگوریتم هم بر مبنای فرآیند تبرید یا بازپخت فلزات بنا نهاده شده است.

در فرآیند تبرید، ابتدا حرارت فلزات را تا دمای بسیار بالایی افزایش داده و سپس یک فرآیند سردسازی و کاهش دمای تدریجی بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد. در این فرآیند در هنگام افزایش حرارت فلز، سرعت جنبش اتم‌های آن به شدت افزایش یافته و در مرحله بعد، کاهش تدریجی دما موجب شکل‌گیری الگوهای خاصی در جایگیری اتم‌های آن می‌شود. این تغییر الگوی اتم‌ها باعث بروز خواص ارزشمندی در فلز تبرید شده می‌گردد، که از جمله می‌توان به افزایش استحکام آن اشاره نمود (فتاحی، ۱۳۸۸).

کوشش (۱۳۹۰) جهت تخمین پارامترهای روش روندیابی سیل ماسکینگام غیرخطی از روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده استفاده کرد. نتایج نشان داد که روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده دقت بالایی در تخمین این پارامترهای مسئله دارد.

ابراهیمی (۱۳۹۱) جهت تخمین ضرایب منحنی رطوبتی خاک از روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده و مدل RETC استفاده کرد. نتایج به دست آمده از مدل RETC با اختلاف ناچیزی تقریباً مشابه روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده بود.

Marrow, 2006 از روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده در حداقل کردن مقدار زمان مورد نیاز توسط کشاورز جهت جا به جا کردن آبپاش‌ها استفاده نمود. او با استفاده از آنیلینگ شبیه‌سازی شده توانست به پیکربندی مناسبی از آرایش لوله‌ها و آبپاش‌ها در سیستم آبیاری متحرک برای ایجاد یکنواختی بارش مناسب در سطح مزرعه دست یابد. حالت بهینه برای حداکثر نرخ بارش در یک دوره ۹۶ ساعته شامل جابه‌جایی‌های ۱۱/۲۵ ساعته در طی چهار روز بود.

مناسب با آسیب‌های زیست‌محیطی و مالی ناشی از تلفات آب گردید.

با توجه به هزینه‌های هنگفت اجرای شبکه‌های آبرسانی و اهمیت تهیه و توزیع آب جهت مصارف گوناگون لازم است شبکه‌های توزیع آب به صورت واقعی مدل و تحلیل گردند (تابش و صفرپور عرفانی، ۱۳۸۰). تحلیل هیدرولیکی شامل یافتن تمام پارامترهای مجهول مربوط به خط لوله و گره‌های شبکه با استفاده از اطلاعات اولیه مربوط به گره‌ها و لوله‌ها می‌شود. در صورتی که روش تحلیل از دقت خوبی برخوردار باشد نتایج حاصل از آن به مطالعات میدانی نزدیک‌تر خواهد شد و در برابر عوامل مختلف مکانیکی و هیدرولیکی به خوبی پاسخگو می‌باشد (جهانگیر و همکاران، ۱۳۹۱). در همین راستا تحقیق حاضر به منظور ارزیابی و مقایسه‌ی کارایی روش آنیلینگ با سایر روش‌های تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های تحت فشار صورت گرفته است.

درون لوله‌ها و روابط هیدرولیکی حاکم بر آن‌ها برنامه‌ای برای رسیدن به مقادیر مجهول مسئله تدوین گردیده است. این برنامه با استفاده از اطلاعات ورودی، به گذر از قیود موجود و ارضاء معادله‌ی افت انرژی در حلقه‌ها و رعایت شرط پیوستگی جریان در گره‌ها برای رسیدن به جواب‌های بهینه‌ی تابع هدف می‌پردازد. مزیت اصلی این برنامه آن است که نمی‌توان، ایراد روش خاصی را در آن وارد دانست، چرا که حدس اولیه نیاز نداشته و جواب‌های هر مرحله تأثیری بر جواب‌های تولید شده در مرحله‌های بعدی نخواهد داشت. آنچه که روند حل مسئله را تا رسیدن به جواب نهایی پیش خواهد برد همان اصول آنیلینگ شبیه‌سازی شده، بر اساس معرفی تابع هدف آن خواهد بود. نتایج حاصل از حل این الگوریتم در برنامه‌ی مذکور، همان جواب‌های تحلیل شبکه شامل: مقادیر دبی جریان یافته در لوله‌ها و ارتفاع پیزومتریک به وجود آمده از آن‌ها در گره‌ها خواهند بود.

مواد و روش‌ها

به منظور تحلیل و ارزیابی شبکه‌های آب تحت فشار ابتدا باید روابط هیدرولیکی مربوط به آن‌ها همراه با قیود مورد نظر، طبق مشخصات شبکه استخراج و بیان شوند. سپس مبانی روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده به عنوان یکی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری جهت حل معادلات شبکه‌های آب تحت فشار شرح داده می‌شود. در این تحقیق برنامه‌ای در محیط برنامه‌نویسی MATLAB R2009a مطابق روابط هیدرولیکی حاکم بر شبکه‌های آب تحت فشار، جهت تحلیل آن‌ها نوشته شد. از این نرم‌افزار به دلیل قابلیت بالا در انجام عملیات ماتریسی و دقت محاسبات ریاضی بالا و مطلوب بهره گرفته شد. لازم به ذکر است در برنامه نوشته شده بر خلاف روش‌های معمول مورد استفاده از یک روش خاص، به عنوان مثال هاردی کراس و یا از مبانی نرم‌افزارهای موجود همانند روش گرادیان به عنوان ملاک تحلیل استفاده نشده است. بلکه با استفاده از اصول حاکم بر جریان تحت فشار

روابط هیدرولیکی بین پارامترها

مهم‌ترین روابط هیدرولیکی که برای تحلیل جریان در شبکه‌ی توزیع آب به کار می‌روند عبارتند از:

- رابطه افت هد لوله

$$\Delta H = H_i - H_j = R(x)Q^n(x) \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، ΔH افت هد در لوله بر حسب متر، H_i و H_j به ترتیب مقادیر انرژی کل در گره‌های بالادست و پایین‌دست، $Q(x)$ دبی لوله بر حسب متر مکعب بر ثانیه، $R(x)$ ثابت مقاومت لوله و n توان است (منزوی، ۱۳۸۳). در این معادله، با توجه به این که برای محاسبه‌ی $R(x)$ ثابت مقاومت لوله از فرمول داریسی-ویسباخ^۱، معادله‌ی (۲) یا هیزن ویلیامز^۲ معادله‌ی (۳) استفاده می‌شود، نمای n به ترتیب برابر ۲ و ۱/۸۵۲ منظور می‌شود. در اکثر حالات یک رابطه غیرخطی

¹ Darcy-Weisbach Formula

² Hazen-Williams Formula

قیود طراحی شبکه‌های آب تحت فشار

- محدودیت سرعت

سرعت در لوله‌های شبکه‌های آب تحت فشار نباید از حدودی بیشتر گردد، زیرا زیاد شدن سرعت سبب افزایش افت فشار و در نتیجه گران شدن تأسیسات ایجاد فشار در شبکه می‌گردد. همچنین احتمال شکسته شدن لوله‌ها را به ویژه در مکان پیوند آن‌ها در اثر پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ افزایش می‌بخشد. کم‌ترین سرعت آب در لوله‌های شبکه‌ی توزیع آب بدین جهت به‌عنوان یک قید در نظر گرفته می‌شود، که در سرعت‌های پایین رسوب بیشتری در لوله‌ها تشکیل شده که این امر باعث کاهش راندمان سیستم می‌گردد (منزوی، ۱۳۸۳). بیش‌ترین سرعت در شبکه‌ی آب، ۲ متر بر ثانیه و کم‌ترین سرعت مجاز، ۰/۳ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود (حمیدخانی، ۱۳۷۵).

- محدودیت فشار

بیش‌ترین فشار در شبکه باید به اندازه‌ای باشد که لوله‌ها بتوانند آن را مخصوصاً در محل پیوندها تحمل نمایند. کم‌ترین فشار آب در شبکه‌ی شهری باید به اندازه‌ای باشد که در ابتدای هر انشعاب فشار لازم برای مصرف کننده وجود داشته باشد (منزوی، ۱۳۸۳).

ساختار کلی الگوریتم آنیلینگ شبیه‌سازی شده

برای حل یک مسئله الگوریتم آنیلینگ شبیه‌سازی شده ابتدا از یک جواب اولیه شروع می‌کند و سپس در یک حلقه تکرار به طرف جواب‌های همسایه حرکت می‌کند. اگر جواب همسایه بهتر از جواب فعلی باشد، الگوریتم آن را به عنوان جواب فعلی قرار می‌دهد. در غیراین صورت، الگوریتم آن جواب را با احتمال $\exp(-\Delta E/T)$ به عنوان جواب فعلی می‌پذیرد. در این رابطه ΔE تفاوت بین تابع هدف جواب فعلی و جواب همسایه است و T یک پارامتر به نام دما است. در هر دما، چندین تکرار انجام می‌شود و سپس دما به آرامی کاهش داده می‌شود. در گام‌های اولیه دما خیلی

بین $Q(x)$ و H برقرار است. همچنین در تحلیل شبکه‌ی توزیع آب معمولاً از افت فشارهای موضعی چشم‌پوشی می‌شود (Bhave, 1995).

$$\Delta H = R(x)Q^r(x) = \frac{fl}{12.1D^5} Q^r(x) \quad (2)$$

$$\Delta H = R(x)Q^{1/82}(x) = \frac{1.49l}{C^{1/82} D^{4/82}} Q^{1/82}(x) \quad (3)$$

در معادلات (۲) و (۳)، l طول لوله برحسب متر، D قطر لوله برحسب متر، f ضریب اصطکاک و C ضریب همزن است (تائبی و چمنی، ۱۳۸۴).

- روابط پیوستگی جریان در گره‌ها

اساس معادلات پیوستگی جریان براین اصل استوار است که دبی ورودی به یک گره باید با دبی خروجی آن برابر باشد. برای تحلیل شبکه در شرایط استاتیکی با سیال تراکم‌ناپذیر، جمع جبری جریان‌های ورودی و خروجی از هر گره باید برابر صفر شود.

$$\sum(Q(x) + q_i) = 0 \quad (4)$$

در رابطه‌ی (۴)، $Q(x)$ مقدار دبی جریان‌یافته در لوله و q_i مقدار دبی جریان ورودی یا خروجی در گره برحسب متر مکعب بر ثانیه هستند (پازوش، ۱۳۸۵).

- رابطه افت فشار در حلقه

در هر حلقه از یک شبکه جمع جبری افت فشارهای لوله‌های تشکیل‌دهنده آن باید برابر صفر شود بنابراین:

$$\sum \Delta H = 0 \quad (5)$$

که در آن $\sum \Delta H$ معرف جمع افت هد تمام لوله‌هایی است که حلقه را تشکیل می‌دهند (منزوی، ۱۳۸۳).

$$(۶) OF = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{x=1}^m Q_x + q_i \right)^2 + \sum_{k=1}^p \left(\sum_{x=1}^m \Delta H_x \right)^2$$

Q_x : دبی در هر یک از لوله‌ها بر حسب متر مکعب بر ثانیه.

q_i : دبی مورد نیاز در هر یک از گره‌ها بر حسب متر مکعب بر ثانیه.

ΔH_k : افت هد در هر یک از حلقه‌ها بر حسب متر.

$\sum_{k=1}^p \sum_{x=1}^m \Delta H_x$: مجموع افت در حلقه‌ها از حلقه شماره ۱ تا p امین حلقه (هر حلقه می‌تواند شامل لوله‌هایی از شماره ۱ تا m باشد).

$\sum_{i=1}^n \sum_{x=1}^m Q_x + q_i$: مجموع روابط پیوستگی در گره‌ها، از گره شماره ۱ تا n امین گره (هر گره می‌تواند متصل به لوله‌هایی از شماره ۱ تا m باشد).

همان طور که مشخص است در تئوری حل مسئله مقدار عددی این تابع باید صفر گردد، زیرا در حالت ایده آل مجموع افت در حلقه‌ها و مجموع روابط پیوستگی در گره‌ها هر کدام باید برابر صفر شوند. اما با توجه به این که بهره‌گیری از روش‌های حل عددی الزاماً برابر حل تحلیلی مسئله نخواهد بود، عملاً جوابی نزدیک به صفر ظاهر می‌گردد. تابع هدف برپایه دو اصل پیوستگی جریان در گره‌ها و افت فشار در حلقه‌ها استوار است. ساختار کلی این تابع شامل مجموع مربعات معادلات افت فشار در لوله‌ها و مربع مجموع معادلات پیوستگی در گره‌هاست. در هر شبکه با هر تعداد حلقه و لوله، الزاماً باید دو اصل ذکر شده هر کدام جداگانه ارضا شوند و به سمت صفر میل کنند. البته لازم به ذکر می‌باشد که این جواب نزدیک به صفر تنها در صورتی ظاهر می‌گردد که جواب‌های حاصل از حل مسئله، همان جواب‌های بهینه (بهترین جواب ممکن) باشند. در غیر این صورت ممکن است هر مقدار عددی مثبت به عنوان مقدار تابع هدف پدیدار شود. تابع هدف معیاری جهت سنجش توانایی ارضای هم‌زمان این قوانین است.

بالا قرار داده می‌شود تا احتمال بیشتری برای پذیرش جواب‌های بدتر وجود داشته باشد. با کاهش تدریجی دما، در گام‌های پایانی احتمال کمتری برای پذیرش جواب‌های بدتر وجود خواهد داشت و بنابراین الگوریتم به سمت یک جواب خوب همگرا می‌شود.

در این الگوریتم مصرف حافظه بسیار پایین است و به دلیل وجود روند تصادفی هدایت شده (احتمال پذیرش پایین برای پاسخ‌های غیر بهینه) توانایی گذر از بهینه محلی^۱ و دستیابی به جواب‌های بهینه سراسری^۲ را دارد. همچنین پیاده‌سازی آن نسبت به الگوریتم‌های دیگر هم رده خود، نسبتاً ساده‌تر است (فتاحی، ۱۳۸۸).

معرفی تابع هدف

هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است. برای یک مسئله، ممکن است جواب‌های مختلفی موجود باشد که برای مقایسه آن‌ها و انتخاب جواب بهینه، تابعی به نام تابع هدف^۳ تعریف می‌شود (فتاحی، ۱۳۸۸).

در واقع برای بهره‌گیری از الگوریتم آنیلینگ شبیه‌سازی شده در مسائل تحلیل هیدرولیکی شبکه‌ی آب، با توجه به ساختار کلی این الگوریتم، نیازمند تابعی به عنوان هدف مسئله هستیم، که در آن پس از ارضای قیود جواب‌های بهینه ظاهر گردند. لذا تابع هدف براساس دو اصل پیوستگی جریان در گره‌ها و افت فشار در حلقه‌ها نوشته شد، به نحوی که قیود طراحی در آن به عنوان شروط مسئله لحاظ شده است. ساختار کلی این تابع که شامل مجموع مربعات معادلات افت فشار در لوله‌ها و مربع مجموع معادلات پیوستگی در گره‌هاست، مطابق رابطه‌ی (۶) خواهد بود. این تابع توسط الگوریتم آنیلینگ شبیه‌سازی شده مینیمم می‌گردد.

^۱ Local Optimal

^۲ Global Optimal

^۳ Objective Function

- H_0 : معرف مقدار ارتفاع پیژومتریک گره‌های چشمه می‌باشد. در صورت وجود پمپ نیز در گره‌ی ورودی فشار آن بر حسب متر، معرفی می‌شود.

ج- ماتریس‌های مربوط به تعیین آرایش شبکه:

- حلقه (Loop): هر سطر آن معرف شماره حلقه باشد و هر ستون در آن معرف شماره لوله باشد. اعداد به کار رفته ارتباط لوله‌ها و حلقه‌ها را با توجه به معیار کلی ساعت‌گرد بودن جهت جریان در حلقه‌ها بیان می‌نمایند. توضیح این‌که در صورت پیروی جهت فرضی نشان داده شده در شبکه از معیار کلی مذکور، عدد ۱ به لوله مورد نظر اختصاص داده می‌شود، در غیر این صورت عدد ۱- جایگزین خواهد شد. لوله‌های غیر مرتبط با حلقه مورد نظر با عدد صفر نشان داده می‌شوند.

- گره (Node): ماتریسی که نشان‌دهنده‌ی چگونگی ارتباط گره‌ها با لوله‌ها است. هر سطر آن معرف شماره لوله باشد و هر ستون در آن معرف شماره گره باشد. به این ترتیب لوله‌هایی که از این گره آغاز می‌گردند، با عدد ۱- و لوله‌هایی که به آن گره ختم می‌شوند با عدد ۱ معرفی می‌شوند و مابقی عناصر صفر می‌باشند.

- اتصال (Connection): ماتریسی که نشان‌دهنده‌ی ارتباط هر گره با گره‌های دیگر، توسط شماره لوله‌ی رابط است. ستون اول معرف گره آغازین ستون دوم گره انتهایی و ستون سوم شماره لوله رابط دو گره است. این ماتریس از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد.

د- ماتریس مجهولات شبکه (متغیرهای تصمیم‌گیری):

- مقادیر دبی لوله‌ها (Q): این ماتریس معرف مقادیر دبی جریان یافته در لوله‌های شبکه توزیع آب است.

- مقادیر فشار در گره‌ها (H): این ماتریس معرف مقادیر فشار در هر یک از گره‌های شبکه توزیع آب است.

در صورتی که بخواهیم به میزان کارایی یک روش پی ببریم، می‌توانیم نتایج محاسبات دبی لوله‌ها و هد گره‌های آن را در تابع هدف قرار دهیم. به این ترتیب با مقایسه‌ی نتایج تابع هدف میزان کارایی روش‌ها در ارضای هم‌زمان معادلات پیوستگی و انرژی به خوبی مشخص می‌گردد. بنابراین روشی دارای قدرت تحلیل بالاتری است که علاوه بر داشتن بهترین (کم‌ترین) مقدار تابع هدف، هم‌زمان هر دو اصل را به صفر برساند. بهترین حالت هنگامی که هر کدام جداگانه به صفر نزدیک شوند، ظاهر می‌گردد.

مشخصات مورد نیاز شبکه جهت تحلیل آن

به منظور تحلیل و ارزیابی یک شبکه‌ی آب تحت فشار ابتدا لازم است، روابط هیدرولیکی حاکم بر آن‌ها، که همان روابط (۴) و (۵) هستند، نوشته شوند. پارامترهای مورد استفاده در این روابط را در قالب ماتریس بیان می‌کنیم. این ماتریس‌ها حاوی اطلاعاتی از مشخصات شبکه شامل: طول لوله‌ها، قطر و ضریب اصطکاک آن‌ها و نحوه‌ی اتصال لوله‌ها در گره‌های مختلف خواهند بود. هم‌چنین مقدار دبی مورد نیاز در گره‌های مصرف، ارتفاع آن‌ها و مقدار دبی ورودی از گره‌های چشمه به همراه رقوم تراز سطح آب در آن‌ها باید معلوم گردند. در صورت وجود پمپ در گره‌ی ورودی میزان فشار آن بر حسب متر، باید مشخص شود. در ادامه به معرفی چهار دسته کلی ماتریس‌های به کار گرفته شده در این تحقیق خواهیم پرداخت.

الف- ماتریس‌های مربوط به مشخصات لوله‌ها:

- L: معرف طول تمامی لوله‌های شبکه می‌باشد.

- D: معرف قطر تمامی لوله‌های شبکه می‌باشد.

- f: معرف ضریب اصطکاک یا فاکتور اصطکاک تمامی لوله‌های شبکه می‌باشد.

ب- ماتریس‌های مربوط به گره‌ها:

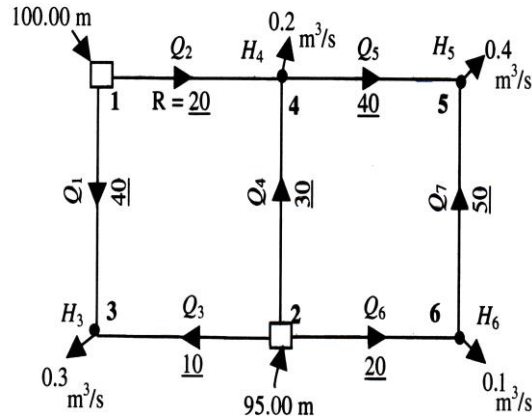
- z: این ماتریس ارتفاع استاتیکی گره‌ها از یک سطح مبنا را بیان می‌کند.

- q: معرف میزان دبی مورد نیاز یا مصرفی در هر یک از گره‌ها باشد.

حل یک مسئله با روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده

در شبکه‌ی آب تحت فشار مطابق شکل (۱)، ارتفاع پیزومتریک گره‌های (۱) و (۲) به ترتیب برابر

با ۱۰۰ و ۹۵ متر آب می‌باشد. مشخصات شبکه شامل: طول لوله‌ها، قطر لوله‌ها و ضریب اصطکاک آن‌ها در جدول (۱) آورده شده است (تائبی و چمنی، ۱۳۸۴).



شکل (۱): مشخصات هندسی و هیدرولیکی شبکه‌ی آب تحت فشار (تائبی و چمنی، ۱۳۸۴).

جدول (۱): مشخصات شبکه‌ی توزیع آب شهری (تائبی و چمنی، ۱۳۸۴).

شماره لوله	طول لوله (متر)	قطر لوله (متر)	ضریب اصطکاک
۱	۳۰۰	۰/۵۵	۰/۰۵۰۵
۲	۲۵۰	۰/۶۵	۰/۰۷۵۰
۳	۲۵۰	۰/۳۰	۰/۰۰۱۱
۴	۳۰۰	۰/۳۰	۰/۰۰۲۹
۵	۲۵۰	۰/۴۵	۰/۰۶۰۵
۶	۲۵۰	۰/۵۰	۰/۳۰۲۰
۷	۳۰۰	۰/۴۵	۰/۰۳۰۷

تشکیل ماتریس‌های مورد نیاز شبکه

ابتدا مطابق با جهت نشان داده شده در شکل (۱)، برای تمام لوله‌های جهتی فرض می‌شود. با تعیین تعداد لوله‌ها، تعداد گره‌ها با ارتفاع پیزومتریک مجهول و تعداد گره‌ها با ارتفاع پیزومتریک ثابت در شبکه‌ی توزیع آب، ماتریس‌های مورد نیاز مشخص می‌گردد. ماتریس‌های طول، قطر و ضریب اصطکاک (f, D, L)، اتصال (Connection)، دبی لوله‌ها (Q)، هد گره‌های با ارتفاع ثابت و مصرف (H, H_0)، ارتفاع گره‌های مصرف (Z)، دبی مورد نیاز در گره‌ها (q)، ماتریس حلقه (Loop) و گره (Node) در شکل (۲) ارائه می‌گردند.

$$[f] = \begin{bmatrix} 0/0810 \\ 0/0990 \\ 0/0012 \\ 0/0029 \\ 0/0360 \\ 0/0305 \\ 0/0385 \end{bmatrix} \quad [D] = \begin{bmatrix} 0/55 \\ 0/65 \\ 0/30 \\ 0/30 \\ 0/45 \\ 0/50 \\ 0/45 \end{bmatrix} \quad [L] = \begin{bmatrix} 300 \\ 250 \\ 250 \\ 300 \\ 250 \\ 250 \\ 300 \end{bmatrix}$$

$$[H_0] = \begin{bmatrix} 100 \\ 95 \end{bmatrix} \quad [q] = \begin{bmatrix} 0/5 \\ 0/5 \\ 0/3 \\ 0/2 \\ 0/4 \\ 0/1 \end{bmatrix} \quad [Z] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[Node] = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad [Loop] = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$[H] = \begin{bmatrix} H_r \\ H_f \\ H_d \\ H_p \end{bmatrix} \quad [Q] = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \\ Q_7 \end{bmatrix} \quad [Connection] = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 1 & 4 & 2 \\ 2 & 3 & 3 \\ 2 & 4 & 4 \\ 4 & 5 & 5 \\ 2 & 6 & 6 \\ 6 & 5 & 7 \end{bmatrix}$$

شکل (۲): مشخصات ماتریسی شبکه‌ی آب تحت فشار

گره در ارتباط مستقیم نیستند، مابقی دریاچه‌های این سطر دارای مقدار صفر می‌باشند. هم‌چنین در سطر دوم ماتریس اتصال، گره ۱ گره آغازین، گره انتهایی شماره ۴ و لوله رابط، شماره ۲ است.

به طور مثال: در سطر اول ماتریس حلقه، لوله‌های ۱ و ۴ که خلاف جهت ساعت‌گرد هستند، با مقدار -۱ و لوله‌های ۲ و ۳ که مطابق جهت ساعت‌گرد هستند، با عدد ۱ نشان داده شده‌اند.

در سطر دوم ماتریس گره، لوله‌های ۳، ۴ و ۶ از گره دوم خارج گردیده‌اند و چون باقی لوله‌ها با این

معرفی شاخص‌های آماری

شاخص‌هایی که به منظور ارزیابی نتایج حاصل از الگوریتم آنیلینگ شبیه‌سازی شده به کار می‌روند، شامل: میانگین خطا AE و ریشه میانگین مربعات خطا $RMSE$ خواهند بود. AE بیانگر مقدار میانگین خطا بوده که اگر صفر و یا نزدیک به صفر باشد بیانگر پیش‌بینی خوب مدل است. اگر این مقدار بالای صفر باشد نشان‌دهنده تخمین بیش از اندازه مدل است. $RMSE$ نشان‌دهنده انحراف مقادیر محاسباتی از مقدار واقعی است. در حالت آرمانی مقدار این شاخص‌ها به ترتیب $AE=0$ و $RMSE=0$ خواهند بود. بیان ریاضی این شاخص‌ها به شرح زیر است.

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^n C_i - O_i}{n} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)^2}{n}} \quad (8)$$

در این روابط:

C_i : مقادیر محاسباتی پارامترهای مورد نظر در هر روش.

O_i : مقادیر واقعی پارامترهای مورد نظر که همان عدد صفر می‌باشد.

n : تعداد کل پارامترها (White more, 1991).

نتایج و بحث

نتایج حل مسئله شامل مقادیر دبی در هر لوله و مقادیر محاسبه شده‌ی سرعت جریان در لوله‌ها با توجه به دبی و سطح مقطع برای شبکه و افت هد در هر یک از لوله‌ها، به ترتیب در جدول (۲) ارائه شده است.

در جدول (۳)، لازم به یادآوری است بر اساس روش‌های مختلف مورد استفاده جهت انجام محاسبات، مقادیر دبی در بعضی از لوله‌ها به صورت منفی ظاهر می‌گردند. این علامت بیانگر صحیح نبودن جهت ابتدایی فرض شده برای انجام حل مسئله می‌باشد، که در نتیجه جهت جریان در آن لوله جهت دستیابی به نتایج صحیح باید تغییر داده شود (تأثیری و چمنی، ۱۳۸۴). طبق این جدول، در روش‌های هاردی کراس، نیوتن-رافسون و نظریه خطی جهت لوله‌ی شماره‌ی چهار به صورت منفی ظاهر گردیده است، اما در روش‌های گرادیان، مدل Epanet و آنیلینگ شبیه‌سازی شده، جهت لوله‌های شماره‌ی سه و چهار به صورت منفی ظاهر گردیده است.

در جدول (۴) مقادیر ارتفاع پیزومتریک گره‌های

مجهول بر حسب متر بر اساس روش‌های مختلف ارائه شده است.

جدول (۲): نتایج حاصل از اجرای برنامه براساس آنیلینگ شبیه‌سازی شده در لوله‌های شبکه.

شماره لوله	دبی (متر مکعب بر ثانیه)	سرعت (متر بر ثانیه)	افت هد در لوله (متر)
۱	۰/۴۱۶۴	۱/۷۵۳	۷/۸۹۵
۲	۰/۵۸۹۲	۱/۷۷۶	۷/۵۰۶
۳	-۰/۱۱۹۴	۱/۶۹۰	۰/۱۹۵۲
۴	-۰/۱۲۰۲	۱/۷۰۱	۰/۵۹۳۰
۵	۰/۲۶۰۷	۱/۶۳۹	۳/۳۱۴
۶	۰/۲۴۱۶	۱/۲۳۰	۱/۴۳۹
۷	۰/۱۳۸۴	۱/۸۷۰	۱/۲۸۳

جدول (۳): مقادیر دبی جریان یافته در لوله‌های شبکه (بر حسب متر مکعب بر ثانیه).

سه روش اول (تأییب و چمنی، ۱۳۸۴) و سه روش دوم محاسبه شده‌اند.

شماره لوله	হারدی کراس	نیوتن رافسون	نظریه خطی	روش گرادیان	مدل Epanet	آنیلینگ شبیه‌سازی شده
۱	۰/۳۲۴۶	۰/۳۲۴۶	۰/۳۶۳۱	۰/۳۲۵۳	۰/۳۱۹۴	۰/۴۱۶۴
۲	۰/۴۷۱۵	۰/۴۷۱۴	۰/۴۷۹۳	۰/۴۷۴۱	۰/۴۹۲۵	۰/۵۸۹۲
۳	۰/۰۲۴۶	۰/۰۲۴۶	۰/۰۶۳۱	-۰/۰۲۵۳	-۰/۰۱۹۴	-۰/۱۱۹۴
۴	-۰/۰۲۱۹	-۰/۰۲۱۷	-۰/۰۲۶۱	-۰/۰۲۵۵	-۰/۰۳۲	-۰/۱۲۰۲
۵	۰/۲۴۹۶	۰/۲۴۹۶	۰/۲۵۳۲	۰/۲۴۸۶	۰/۲۶۰۱	۰/۲۶۰۷
۶	۰/۲۵۰۳	۰/۲۵۰۴	۰/۲۴۶۸	۰/۲۵۱۳	۰/۲۳۹۸	۰/۲۴۱۶
۷	۰/۱۵۰۴	۰/۱۵۰۴	۰/۱۴۶۸	۰/۱۵۱۳	۰/۱۳۹۱	۰/۱۳۸۴

نتایج صحیح باید تغییر داده شود (تأییب و چمنی، ۱۳۸۴). طبق این جدول، در روش‌های هاردی کراس، نیوتن-رافسون و نظریه خطی جهت لوله‌ی شماره‌ی چهار به صورت منفی ظاهر گردیده است، اما در روش‌های گرادیان، مدل Epanet و آنیلینگ شبیه‌سازی شده، جهت لوله‌های شماره‌ی سه و چهار به صورت منفی ظاهر گردیده است.

در جدول (۴) مقادیر ارتفاع پیزومتریک گره‌های مجهول بر حسب متر بر اساس روش‌های مختلف ارائه شده است.

نتایج حل مسئله شامل مقادیر دبی در هر لوله و مقادیر محاسبه شده‌ی سرعت جریان در لوله‌ها با توجه به دبی و سطح مقطع برای شبکه و افت هد در هر یک از لوله‌ها، به ترتیب در جدول (۲) ارائه شده است.

در جدول (۳)، لازم به یادآوری است بر اساس روش‌های مختلف مورد استفاده جهت انجام محاسبات، مقادیر دبی در بعضی از لوله‌ها به صورت منفی ظاهر می‌گردند. این علامت بیانگر صحیح نبودن جهت ابتدایی فرض شده برای انجام حل مسئله می‌باشد، که در نتیجه جهت جریان در آن لوله جهت دستیابی به

جدول (۴): مقادیر ارتفاع پیزومتریک گره‌های مجهول (بر حسب متر).

سه روش اول (تأییب و چمنی، ۱۳۸۴) و سه روش دوم محاسبه شده‌اند.

شماره گره	হারدی کراس	نیوتن رافسون	نظریه خطی	روش گرادیان	مدل Epanet	آنیلینگ شبیه‌سازی شده
۳	۹۴/۰۹۸	۹۴/۰۹۸	۹۴/۹۴۰	۹۵/۰۱۱	۹۵/۰۰۶	۹۵/۱۹۵
۴	۹۵/۰۲۵	۹۵/۰۲۴	۹۵/۰۳۵	۹۵/۰۳۳	۹۵/۰۵۱	۹۵/۵۹۳
۵	۹۱/۹۶۴	۹۱/۹۶۴	۹۱/۰۷۰	۹۱/۹۳۶	۹۲/۲۸۳	۹۲/۲۷۶
۶	۹۳/۴۶۱	۹۳/۴۶۱	۹۳/۵۰۱	۹۳/۴۵۰	۹۳/۵۷۹	۹۳/۵۵۹

جدول (۵): نتایج بررسی قانون بقای جرم در گره‌های شبکه.

شماره گره	رابطه‌ی پیوستگی در گره	هاردی کراس	نیوتن رافسون	نظریه خطی	روش گرادیان	مدل Epanet	آنیلینگ شبیه‌سازی شده
۳	$Q_1 - Q_3 = q_3$	۰/۰۲۴۶	۰/۰۲۴۶	۰/۱۲۶۲	۰	۰	-۰/۰۰۳
۴	$Q_2 - Q_4 - Q_5 = q_4$	-۰/۰۰۰۴	۰	۰	۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۸
۵	$Q_5 + Q_7 = q_5$	۰	۰	۰	-۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۸	-۰/۰۰۱
۶	$Q_6 - Q_7 = q_6$	۰	۰/۰۰۰۲	۰	۰	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۳

جدول (۶): نتایج بررسی قانون بقای انرژی در حلقه‌های شبکه.

شماره حلقه	رابطه‌ی افت انرژی در حلقه	هاردی کراس	نیوتن رافسون	نظریه خطی	روش گرادیان	مدل Epanet	آنیلینگ شبیه‌سازی شده
۱	$h_{f1} + h_{f2} - h_{f3} - h_{f4} = 0$	۰/۰۲۷۱	۰/۰۲۴۷	-۰/۹۰۸	۰/۰۴۴	۰/۶۰۰	۰/۰۱۰۶
۲	$h_{f5} - h_{f4} - h_{f6} - h_{f7} = 0$	-۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۱۷۷	-۰/۰۵۹	۰/۵۳۵	۰/۰۰۰۰۷

در هر یک از لوله‌ها تعیین و بر اساس رابطه‌ی (۴)، افت انرژی در حلقه‌های شبکه محاسبه می‌گردند. پس از بررسی ارضاء قانون بقای جرم و انرژی و محاسبه‌ی مقادیر رابطه‌ی پیوستگی در گره‌ها و افت انرژی در حلقه‌ها، به منظور کنترل نتایج از شاخص‌های آماری AE و RMSE استفاده شده است. مقادیر به دست آمده برای این شاخص‌ها در جدول (۷) و (۸) ارائه شده است.

با توجه به جهت‌های تعیین شده برای دبی جریان یافته در لوله‌های شبکه در روش‌های مختلف، رابطه‌ی پیوستگی متناسب با آن در هر روش نوشته شد. نتایج بررسی قانون بقای جرم در گره‌های شبکه برای مقایسه بهتر در جدول (۵) ارائه شده است. نتایج جدول (۶) بر اساس لوله‌های تشکیل دهنده هر حلقه، چگونگی ارضاء قانون بقای انرژی در حلقه‌های شبکه را در روش‌های مختلف نشان می‌دهد. در این جدول مطابق با رابطه‌ی (۱)، افت هد

جدول (۷): نتایج بررسی قانون بقای جرم در گره‌های شبکه با شاخص‌های آماری.

شاخص آماری	آنیلینگ شبیه‌سازی شده	مدل Epanet	روش گرادیان	نظریه خطی	نیوتن رافسون	هاردی کراس
AE	۰/۰۰۱۷۵	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۳۱۵	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۶۰۵
RMSE	۰/۰۰۴۵۵	۰/۰۰۰۰۵۶۸	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۶۳۱	۰/۰۱۲۳	۰/۰۱۲۳

روش‌های گرادیان و مدل Epanet قرار دارد. اما به طور کلی با توجه به اینکه مقادیر شاخص‌های AE و RMSE در این روش نزدیک به صفر هستند، بنابراین دقت قابل قبولی در ارضاء این رابطه داشته است.

با ملاحظه‌ی مقادیر شاخص‌های آماری جدول (۷) می‌توان بیان داشت در ارضاء قانون بقای جرم روش گرادیان کمترین مقدار خطا و روش نظریه خطی بیشترین مقدار خطا را داشته است. روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده در ارضاء قانون بقای جرم پس از

جدول (۸): نتایج بررسی قانون بقای انرژی در گره‌های شبکه با شاخص‌های آماری.

شاخص آماری	آنیلینگ شبیه‌سازی شده	مدل Epanet	روش گرادیان	نظریه خطی	نیوتن رافسون	হারدی کراس
AE	۰/۰۰۵۳۴	۰/۵۶۷۸	-۰/۰۰۷۱۶	-۰/۳۶۵۶	۰/۰۱۲۴	۰/۰۱۳۴
RMSE	۰/۰۰۷۵۰	۰/۵۶۸۷	۰/۰۵۲۴۷	۰/۶۵۴۸	۰/۰۱۷۴	۰/۰۱۹۱

با توجه به اینکه مقادیر شاخص‌های AE و RMSE در روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده نزدیک به صفر هستند، بنابراین دقت بالایی در ارضاء این رابطه داشته است. اما سایر روش‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای با این روش دارند.

با ملاحظه‌ی مقادیر شاخص‌های آماری جدول (۸) می‌توان بیان داشت در ارضاء قانون بقای انرژی روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده و نیوتن رافسون کمترین مقدار خطاها را داشته‌اند. بیشترین مقدار خطاها در روش‌های نظریه خطی و مدل Epanet بوده است.

جدول (۹): مقایسه مقدار تابع هدف آنیلینگ شبیه‌سازی شده با سایر روش‌ها.

روش تحلیل	هاردی کراس	نیوتن رافسون	نظریه خطی	گرادیان	مدل Epanet	آنیلینگ شبیه‌سازی شده
مقدار تابع هدف	۰/۰۰۱۳۲	۰/۰۰۱۲	۰/۸۷۳۴۸	۰/۰۰۵۵۰	۰/۶۴۶۹۹	۰/۰۰۰۱۶

شبکه موجب می‌گردد، که با تعداد محاسبات کم‌تر و همگرایی سریع‌تر نسبت به سایر روش‌های تکرار بتوان به اهداف موردنظر دست‌یافت. البته خاطر نشان می‌گردد که حجم محاسبات به مقادیر حدس اولیه‌ی پارامترهای فوق بستگی دارد. با توجه به مقادیر شاخص‌های AE و RMSE آنیلینگ شبیه‌سازی شده در مقایسه با سایر روش‌ها به حالت آرمانی خود نزدیک‌تر هستند، بنابراین این روش دقت بالاتری در ارضاء قانون بقای جرم و بقای انرژی داشته است. نتایج ارزیابی آنیلینگ شبیه‌سازی شده از طریق مقدار تابع هدف آن نشان داد، علاوه بر دقت جواب‌های این روش، این مقادیر بهترین جواب‌های ممکن برای حل مسئله خواهند بود.

نتیجه‌گیری

تحلیل هیدرولیکی شبکه غالباً برای تعیین عملکرد هیدرولیکی شبکه و در مواردی نیز برای کنترل روش طراحی و بهینه‌سازی طرح استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر به منظور بررسی توانمندی روش آنیلینگ

با توجه به تابع هدف معرفی شده، مقادیر ارضاء قانون بقای جرم در گره‌ها و قانون بقای انرژی در حلقه‌ها به صورت توأم با هم در تحلیل شبکه مؤثر خواهند بود. علی‌رغم آنچه در مورد برتری یک روش نسبت به سایر روش‌ها در ارضاء یکی از این قوانین با توجه به جدول ۷ و ۸ بیان گردید، در نهایت مقدار تابع هدفی که از اثر توأم ارضاء این قوانین به دست می‌آید، معرف برتری نهایی یک روش در تحلیل هیدرولیکی یک شبکه خواهد بود.

لذا پس از بررسی مقادیر جداول ۵ و ۶ در مورد ارضاء قانون بقای جرم و قانون بقای انرژی، با مراجعه به جدول ۹ به خوبی می‌توان تأثیر هم‌زمان این مقادیر را در تعیین مقدار تابع هدف مشاهده نمود. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌گردد، کمترین مقدار تابع هدف مربوط به آنیلینگ شبیه‌سازی شده می‌باشد که این مقدار گویای برتری این روش بر سایر روش‌ها در تعیین پارامترهای شبکه و تحلیل آن می‌باشد.

آنیلینگ شبیه‌سازی شده با توجه به عدم نیاز به رعایت اصل پیوستگی جریان در حدس اولیه گره‌های

آسودگی بیشتر در خصوص همگرایی جواب‌ها به مقدار بهینه نسبت به سایر روش‌های تکرار به اهداف مورد نظر دست یابد. البته خاطر نشان می‌گردد که حجم محاسبات به دامنه‌ی در نظر گرفته شده از سوی کاربر برای جستجوی جواب‌ها بستگی دارد و امکان انجام محاسبات متعدد به راحتی فراهم می‌باشد.

بر اساس این ارزیابی می‌توان آنیلینگ شبیه‌سازی شده را روشی جدید و قابل اطمینان در طراحی و تحلیل شبکه‌های آب تحت فشار دانست. لذا با توجه به اینکه تحلیل یکی از مسائل مهم در هیدرولیک است و بخش اصلی فرآیند طراحی شبکه می‌باشد و نیز با احراز توانایی لازم این روش در تحلیل شبکه‌های توزیع آب پیشنهاد می‌گردد تحقیقات مشابهی در سایر موضوعات مرتبط با این مهم صورت پذیرد. بررسی میزان دبی در لوله‌ها و فشار در گره‌های شبکه‌های مورد بهره برداری و مقایسه‌ی آن‌ها با این روش می‌تواند به اثبات کارایی و همچنین نشان دادن نقاط ضعف آن کمک شایانی نماید. به منظور تحلیلی دینامیکی نیز می‌توان تمام شرایطی که یک شبکه می‌تواند در معرض آن قرار گیرد و پدیده‌هایی که ممکن است در یک شبکه به وقوع بپیوندد را شناسایی کرده و با بررسی آن‌ها به شناخت روابطی که بهترین مقادیر این پدیده‌ها را ارائه می‌دهند پرداخت و تحلیلی واقع بینانه از طرح به دست آورد.

شبیه‌سازی شده در تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آب تحت فشار و ارزیابی آن از محیط برنامه‌نویسی MATLAB R2009a استفاده شد.

به منظور ارزیابی عملکرد روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده در تعیین پارامترهای مورد نظر، نتایج آن با نتایج حاصل از روش‌های هاردی کراس، نیوتن-رافسون، نظریه خطی، روش گرادیان و مدل Epanet مقایسه شد. تحلیل شبکه توزیع آب به منظور درک سیستم یا ارزیابی فیزیکی آن لازم و ضروری است. تعیین دقیق پارامترهای مجهول در شبکه‌ی دو حلقه‌ای و ارضای قوانین بقای جرم و انرژی توسط روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده توانایی این روش را در تحلیل شبکه به خوبی نشان دادند.

هم‌چنین با شاخص‌های AE و $RMSE$ به برآورد خطا در ارضاء قانون بقای جرم و بقای انرژی پرداخته شد. نتایج بررسی ارضاء قانون بقای جرم نشان داد که روش گرادیان و مدل Epanet برتری نسبی به روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده دارند و در ارضاء قانون بقای انرژی روش آنیلینگ شبیه‌سازی شده نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد. اما در مجموع با توجه به مقدار به دست آمده $0/00016$ برای تابع هدف آنیلینگ شبیه‌سازی شده، برتری کلی و توانایی آن بر سایر روش‌ها اثبات گردید. علاوه بر این آنیلینگ شبیه‌سازی شده با توجه به عدم نیاز به حدس اولیه در تحلیل جریان شبکه موجب می‌گردد، که کاربر بتواند با

منابع:

- ابراهیمی، ر. ۱۳۹۱. تخمین ضرایب منحنی رطوبتی خاک با روش بهینه‌سازی آنیلینگ شبیه‌سازی شده. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی. دانشگاه بوعلی سینا. همدان.
- بابازاده، ح. و م. ر. بهشتی. ۱۳۸۹. طراحی شبکه‌های تأمین آب. انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی. واحد علوم و تحقیقات تهران. ۴۸۴ صفحه.
- پازوش، ه. ۱۳۸۵. مکانیک سیالات و هیدرولیک مهندسی. انتشارات دانشگاه تهران. ۶۷۲ صفحه.
- تائی، ا. و م. ر. چمنی. ۱۳۸۴. شبکه‌های توزیع آب شهری. دانشگاه صنعتی اصفهان. ۶۰۰ صفحه.
- تابش، م. و ا. م. صفرپور عرفانی. ۱۳۸۰. تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی شهری با در نظر گرفتن وابستگی جریان‌ات خروجی (مصرف و نشت). سومین کنفرانس هیدرولیک ایران.

- تابش، م. و م. م. واسطی. ۱۳۸۸. حذف اثر حدس اولیه در حل معادلات H به روش نیوتن رافسون جهت تغییر شبکه‌های آبرسانی شهری. اولین کنفرانس مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، تهران.
- جهانگیر، م.، غ. بارانی و ع. جهانگیری. ۱۳۹۱. مدیریت هوشمند فشار و کاهش نشت شبکه‌های آبرسانی در محیط water Gems مطالعه موردی مجتمع آبرسانی دوحصاران خراسان جنوبی. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال چهارم، شماره سیزدهم صفحه ۴۵.
- حمیدخانی، ع. ۱۳۷۵. طراحی شبکه‌های آبرسانی LOOP. انتشارات کتاب دانشگاهی. ۱۶۰ صفحه.
- فتاحی، پ. ۱۳۸۸. الگوریتم‌های فرا ابتکاری. انتشارات دانشگاه بوعلی سینا. ۲۳۴ صفحه.
- کوشش، ص. ۱۳۹۰. تخمین ضرایب روش روندیابی سیل ماسکینگام غیرخطی با تکنیک بهینه‌سازی SA. ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی. دانشگاه بوعلی سینا. همدان.
- منزوی، م. ت. ۱۳۸۳. آبرسانی شهری. انتشارات دانشگاه تهران. ۳۷۷ صفحه .
- Ahmed, I. 1997. Application of the Gradient Method for the Analysis of Unsteady Flow in Water Networks. College H, E University of Arizona.
- Bhave, P. R. 1995. Rapid convergence in Hardy Cross method of network analysis. Journal Indian water works association .vol 16 no 1pp1:5.
- Bhave, P. R. and R. Gupta. 2006. Hardy Cross method. Analysis of Water Distribution Networks. Alpha Science Int'l Ltd., 187-188
- Lindell, E Ormsbee. 2006. The History of Water Distribution Network Analysis: The Computer Age. 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, 27-30.
- Lin, Y. C and H. D. Yen. 2008. Identifying ground water pumping source information using Simulated Annealing. Hydrological Processes, 22(16):3010-3019.
- Luenberger, D. G. and Y. Yinyu. 2008. Linear and nonlinear programming international series in operations research and management science. Stanford University.
- Marrow, J. 2006. A Simulated Annealing approach to irrigation.
- Martin, D. W. and G. Peters. 1963. The Application of Newton's Method to Network Analysis by Digital Computer, Journal of Institution of Water Engineers and Scientist, Vol. 115.
- Mays, L. W. 1999. Water Distribution Systems Hand book. MC Graw Hill.
- Mohammadi, M., G. H. Barani and K. Qaderi. 2013. Using Simulated Annealing (SA), Evolutionary Algorithm to Determine Optimal Dimensions of Clay Core in Earth Dams. International journal of Advanced Biological and Biomedical Research ISSN: 2322 - 4827, Volume 1, Issue 4, 2013: 382-397.
- Sousa, J., J. Muranho, A. Sá Marques and R. Gomes. 2015. Optimal Management of Water Distribution Networks with Simulated Annealing: The C-Town Problem. Journal of Water Resources Planning and Management. pp:1943-5452.
- Todini, E. and S. Pillati. 1987. Gradient method for the analysis of pipe networks. International Conference on Computer Application for Water Supply and Distribution. Leicester Polytechnic, UK.
- Whitmore, A. P. 1991. A method for assessing the goodness of computer simulation of soil processes J. Soil Sci. 42:289-299.
- Wood, D. J. and C. O. A. Charles. 1972. Hydraulic Network Analysis Using Linear theory. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 98, No. HY7, pp. 1157-1170.

Comparison the Efficiency of Annealing Method with other Methods in Hydraulic Analysis of Water Pipe Networks.

Sahar alsadat Razavian¹, Seyed Moezeddin Nabavi Hamedani², Hossein Babazadeh³

Abstract

Hydraulic analysis of water networks contains determination of the distribution rate in each pipe and head of network nodes. Nowadays using meta-heuristic algorithm Simulated Annealing is increasing in solving complex engineering problems according to capabilities. Purpose of this study hydraulic analysis of water distribution network based on simulated annealing and comparing the results according to statistical indices: AE and RMSE with numerical methods: Hardy Cross, Newton-Raphson, Linear theory, Gradient and Epanet software. To determine the ability of a variety of methods to simultaneously continuity equation and energy loss network, the Objective Function is used. At the end amount of Objective Function Simulated Annealing for two loops network is 0.00016 and assessing index results indicates its accuracy in reaching problem solutions. These results prove efficiency of this method towards the other conventional methods. According the assessment can recommend Simulated Annealing as a new method and reliable in designing and analysing pressurized water networks.

Key words: Hydraulic analysis, Network equations, Numerical methods, Objective Function, Statistical indicators.

¹ M.Sc., Water Engineering Department, BuAli Sina University, Hamedan, Iran. Irrigation_razavian@yahoo.com. (Corresponding author)

² M.Sc. Student, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.ed_nabavi@yahoo.com

³ Associate Professor, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. h_babazadeh@hotmail.com