

## تحلیل مبتنی بر فشار در شبکه‌های توزیع آب به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

محمدعلی گرانمهر<sup>\*</sup>، محمدرضا چمنی و کیوان اصغری<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۱۱)

### چکیده

وقتی که شبکه با کمبود فشار مواجه شود و یا دبی تقاضا در گره‌ها بیشتر از مقدار طراحی شده باشد، شبکه اغلب نمی‌تواند تقاضای مورد نیاز در گره‌ها را به‌طور کامل تأمین کند. بررسی رفتار شبکه در این حالت، نیازمند استفاده از روش تحلیل مبتنی بر فشار است. برخلاف تحلیل مبتنی بر تقاضا، در این حالت لازم است برای هر گره معادله‌ای بین فشار و دبی تقاضا در نظر گرفته شود تا به‌طور هم‌زمان با سایر معادلات هیدرولیکی شبکه حل شود. در این پژوهش، سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری جهت تحلیل شبکه به روش مبتنی بر فشار براساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET توسعه داده شد تا به‌توان به‌سادگی رفتار شبکه در شرایط کمبود فشار را شبیه‌سازی کرد. شبکه‌ای چهار حلقه‌ای از پژوهش‌های پیشین انتخاب شد و تحلیل شبکه، براساس روش‌ها و روابط مختلف بین فشار و دبی تقاضا ارائه شده است. نتایج تحلیل شبکه نشان می‌دهد، مدل ارائه شده به‌خوبی مدل‌های پیشین بود و در مقایسه با برخی روش‌ها، عملکرد بهتری نیز در همگرایی دارد. استفاده از رابطه‌های مختلف فشار-تقاضا، تأثیر زیادی در جواب نهایی حاصل از تحلیل مبتنی بر فشار ندارد، درحالی‌که اختلاف نتایج حاصل از تحلیل مبتنی بر فشار و تحلیل مبتنی بر تقاضا، قابل توجه است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل مبتنی بر فشار، سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری، شبکه‌های توزیع آب، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

۱. دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mgeranmehr@gmail.com

## مقدمه

با افزایش جمعیت و پیشرفت سطح زندگی، مصرف آب روزبه‌روز بیشتر می‌شود. شبکه‌های توزیع آب براساس تأمین نیاز آبی شهر طراحی می‌شوند. وقتی فشار شبکه از مقدار حداقل لازم کمتر شود، نیاز آبی گره‌ها به‌طور کامل تأمین نشده و مصرف کل کاهش می‌یابد. تحلیل شبکه در این شرایط نیاز به توسعه مدل تحلیل مبتنی بر فشار دارد. به‌طور کلی دو نوع تحلیل در شبکه‌های آبرسانی مرسوم است. روش اول که در اغلب مدل‌های نرم‌افزاری استفاده می‌شود، تحلیل مبتنی بر تقاضا (DDA: Demand Driven Analysis) است. در این روش فرض می‌شود نیاز آبی گره‌ها، مستقل از مقدار فشار گره‌ای بوده و باید به‌طور کامل تأمین شود. معادلات پیوستگی در گره‌ها و معادلات بقای انرژی در حلقه‌ها دو دسته معادلات این روش هستند که به‌طور هم‌زمان حل می‌شوند. روش دوم، تحلیل مبتنی بر فشار (PDA: Pressure Dependent Analysis) است که در آن علاوه بر معادلات اشاره شده، معادله‌ای برای هر گره جهت ارتباط بین فشار و دبی تقاضای آن گره در نظر گرفته شد که لازم است به‌طور هم‌زمان با معادلات اصلی حل شوند. در روش مبتنی بر فشار، اگر فشار در گره‌ای کمتر از مقدار حداقل باشد، گره هیچ مقدار تقاضایی را نمی‌تواند تأمین کند. اگر فشار بیشتر از مقدار مشخصی باشد، گره می‌تواند همه تقاضای مورد نیاز را به‌طور کامل تأمین کند. در صورتی که فشار بین دو مقدار مذکور است، تقاضای گره نیز تا حدی تأمین می‌شود (ولی نه به‌طور کامل). از تحلیل مبتنی بر فشار در شرایطی استفاده می‌شود که شبکه با کمبود فشار مواجه باشد. به عبارت دیگر، فشار کافی در یک یا چند گره از شبکه جهت تأمین دبی تقاضای مورد نیاز، وجود نداشته باشد. در این شرایط اگر از تحلیل مبتنی بر تقاضا استفاده شود، نتایج نادرست و نامنتظر بر واقعیت مثل فشارهای منفی زیاد و ناممکن حاصل می‌شود.

جهت انجام تحلیل مبتنی بر تقاضا، می‌توان از نرم‌افزارهای موجود مثل EPANET (۱)، WaterGEMS (۲) و یا حل

معادلات هیدرولیکی حاکم بر شبکه به روش‌هایی مثل روش هاردی-کراس، روش نیوتن-رافسون، روش نظریه خطی و روش گرادیان، استفاده کرد. تحلیل مبتنی بر فشار به این سادگی نیست و با دو چالش مهم روبه‌رو است. از چه رابطه‌ای بین دبی تقاضا و فشار گره‌ای استفاده شود و معادلات جدید اضافه شده چگونه در کنار سایر معادلات شبکه حل شوند؟ برای چالش اول، محققان روابط مختلفی ارائه داده‌اند که اغلب تجربی و یا نیمه‌تحلیلی هستند. برخی به‌سادگی قابل محاسبه بوده و برخی پیچیدگی محاسباتی دارند. تعدادی از این روابط در بخش بعدی مقاله بررسی خواهد شد. در بررسی چالش دوم، تاکنون رویکردهای مختلفی پیشنهاد شده که در ادامه سه رویکرد اصلی و متداول بررسی می‌شود. رویکرد اول، توسعه مدل کامل تحلیل هیدرولیکی با لحاظ معادلات جدید است که محدودیت‌های زیادی دارد و معمولاً فقط در پروژه‌های پژوهشی انجام می‌شود. برای مثال، گوپتا و بی‌هاو (۳) روشی بر مبنای روش هاردی-کراس، تابش و همکاران (۴)، تانیومباه و تمپلمن (۵)، روش‌هایی بر مبنای روش نیوتن-رافسون و گوپتا و همکاران (۶) روشی بر مبنای روش گرادیان، برای انجام تحلیل مبتنی بر فشار ارائه دادند. اغلب این روش‌ها پیچیدگی محاسباتی داشت، برای همه انواع شبکه‌ها قابل استفاده نبود و در برخی موارد، عدم همگرایی نیز گزارش شده است (۷). رویکرد دوم استفاده از ویژگی آب‌فشان در نرم‌افزار EPANET است که می‌توان به کمک آن و با یک فرایند تکرار، وضعیت تحلیل مبتنی بر فشار را شبیه‌سازی کرد (۸، ۹ و ۱۰). این روش به دلیل عدم انطباق کامل منطق حاکم بر آب‌فشان و روابط تحلیل مبتنی بر فشار، خطای محاسباتی به همراه دارد. این ویژگی در نسخه سوم EPANET به صورت رسمی اعمال خواهد شد (۱۱). رویکرد سوم استفاده از تحلیل مبتنی بر تقاضا به همراه فرایند تکرار برای به‌روزرسانی دبی تقاضا در گره‌هاست، به گونه‌ای که رابطه بین دبی تقاضا و فشار گره‌ای، برقرار شود. یکی از پایدارترین مدل‌های ارائه شده در این زمینه، مدل EPANET-IMNO است (۱۲).

بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل معادلات تحلیل شبکه در حالت مبتنی بر فشار، از دیگر ویژگی‌های مثبت این تحقیق است. استفاده از EPANET که یک شبیه‌ساز هیدرولیکی متن باز و متداول برای شبکه آب است، عدم محدودیت در انتخاب ابعاد شبکه و نوع المان‌ها را به همراه داشته و نتایج تحلیل را قابل اعتماد می‌کند.

## مواد و روش‌ها

### روابط تحلیل مبتنی بر فشار

روابط تجربی و نیمه‌تجربی بین دبی تقاضا و فشار گره‌ای توسط پژوهشگران ارائه شده است. در این مقاله، برخی از متداول‌ترین روابط که به فرم معادله (۱) هستند، در نظر گرفته شده است:

$$[1] \begin{cases} Q_j^{avl} = 0 & p_j < p_j^{\min} \\ 0 \leq Q_j^{avl} \leq Q_j^{req} & p_j^{\min} \leq p_j \leq p_j^{des} \\ Q_j^{avl} = Q_j^{req} & p_j^{des} < p_j \end{cases}$$

در این رابطه  $Q_j^{avl}$  و  $Q_j^{req}$  به ترتیب دبی مورد نیاز و دبی قابل تأمین (موجود) توسط شبکه در گره  $j$ ام،  $p_j^{\min}$ ،  $p_j^{des}$  و  $p_j$  به ترتیب فشار حداقل (حدی که اگر فشار از آن کمتر شود، گره هیچ تقاضایی را تأمین نمی‌کند)، فشار مطلوب (حدی که اگر فشار از آن بیشتر باشد، گره همه تقاضای مورد نیاز را به‌طور کامل تأمین می‌کند) و فشار موجود در گره  $j$ ام است. همان‌طور که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود، وقتی فشار یک گره بین دو مقدار فشار حداقل و فشار مطلوب است، دبی تقاضای آن، تا حدی برآورده شده که این مقدار، تابعی از فشار موجود، فشار حداقل، فشار حداکثر و دبی تقاضای مورد نیاز گره است. برخی از روابط متداول تحلیل مبتنی بر فشار در جدول (۱) ارائه شده است.

### الگوریتم تحلیل مبتنی بر فشار

در این مقاله از مدل بهینه‌ساز مطابق روابط (۲) تا (۶) برای حل معادلات شبکه در حالت تحلیل مبتنی بر فشار، استفاده شده است.

هریک از این رویکردها، معایب و مزایایی داشته و تاکنون مدل جامع و قابل اعتمادی برای انجام تحلیل مبتنی بر فشار ارائه نشده است. اغلب رویکردهای ذکر شده نیز فقط در زمینه پژوهشی توسعه داده شده و صرفاً با بهره‌گیری از دانش برنامه‌نویسی می‌توان از آنها استفاده کرد. جهت توسعه مدل‌های کاربردی، برخی محققان با اعمال تغییراتی در EPANET و ارائه نسخه‌های غیررسمی، ویژگی تحلیل مبتنی بر فشار را به آن اضافه کرده‌اند. برای مثال، WaterNetGen نسخه‌ای غیر رسمی از EPANET بوده که علاوه بر ویژگی انجام تحلیل مبتنی بر فشار (براساس رویکرد اول و رابطه واگنر)، توانایی بهینه‌سازی قطر لوله‌های شبکه را نیز دارد (۱۳ و ۱۴). برنامه EPANET-EMITTER نیز نسخه‌ای غیر رسمی از EPANET با قابلیت انجام تحلیل مبتنی بر فشار براساس رویکرد دوم است (۸). نرم‌افزار CWSNET نسخه بهبود یافته دیگری از EPANET با توانایی انجام تحلیل مبتنی بر فشار است (۱۵).

امروزه با توسعه سخت‌افزارها و افزایش سرعت رایانه‌ها، استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری، فقط محدود به مسائل بهینه‌سازی نیست. مسائلی که شامل حل دستگاه معادلات غیرخطی هستند را نیز می‌توان به فرم یک مسئله بهینه‌سازی نوشت و به کمک این روش‌ها و به‌سادگی حل کرد. در این حالت مجهولات دستگاه معادلات، متغیرهای تصمیم مسئله بهینه‌سازی خواهد بود. برای مثال، موسویان و جعفرزاده (۱۶) از الگوریتم بهینه‌ساز تکامل تفاضلی برای حل معادلات هیدرولیکی شبکه در شرایط وجود نشت از شبکه، با موفقیت استفاده کردند. در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO: Particle Swarm Optimization) و به کمک نرم‌افزار EPANET، مدل پشتیبان تصمیم جهت انجام تحلیل مبتنی بر فشار ارائه شده است. این مدل می‌تواند فایل شبکه را فراخوانی کرده و با انتخاب نوع رابطه و تنظیم پارامترهای مربوطه، تحلیل مبتنی بر فشار را انجام داده و نتایج را نمایش دهد. از مزیت‌های این مدل، می‌توان به رابط کاربری گرافیکی و سهولت استفاده اشاره کرد. بهره‌گیری از الگوریتم قدرتمند

جدول ۱. تعدادی از روابط بین فشار و دبی تقاضای گره‌ای در روش تحلیل مبتنی بر فشار

رابطه بین دبی تقاضا و فشار گره ای	پژوهشگران
$Q_j^{avl} = Q_j^{req} \left( 1 - b_j e^{-c_j \left( \frac{p_j - p_j^{min}}{p_j^{des} - p_j^{min}} \right)} \right)$	گرمانوپولوس (۱۷)
$Q_j^{avl} = Q_j^{req} \left( 1 - \alpha_j e^{-c_j \left( \frac{p_j - p_j^{min}}{p_j^{des} - p_j^{min}} \right)} \right)$	گوپتا و بی‌هاو (۳)
$Q_j^{avl} = Q_j^{req} \left( \frac{p_j - p_j^{min}}{p_j^{des} - p_j^{min}} \right)^{\frac{1}{n}}$	واگنر و همکاران (۱۸)
$Q_j^{avl} = Q_j^{req} \frac{(p_j - p_j^{min})^r (r p_j^{des} - r p_j - p_j^{min})}{(p_j^{des} - p_j^{min})^r}$	فوجیوارا و لی (۱۹)
$Q_j^{avl} = Q_j^{req} \sin^r \left( \frac{p_j - p_j^{min}}{p_j^{des} - p_j^{min}} \right)$	توسیاریلی و همکاران (۲۰)
$Q_j^{avl} = Q_j^{req} \frac{\exp(\alpha_j + \beta_j p_j)}{1 + \exp(\alpha_j + \beta_j p_j)}$	تانیومبا و تمپلمن (۵)
$\alpha_j = \frac{-4/595 p_j^{des} - 6/907 p_j^{min}}{p_j^{des} - p_j^{min}}, \beta_j = \frac{11/502}{p_j^{des} - p_j^{min}}$	

### الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (۲۱) با الهام از حرکت پرندگان و ماهی‌ها و براساس مفهوم هوش ازدحامی توسعه داده شده است. این الگوریتم در عین سادگی، یکی از قدرتمندترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حوزه مسائل پیوسته است. در این الگوریتم، هر ذره نمایانگر یک جواب احتمالی برای مسئله بهینه‌سازی است. ابتدا تعدادی دلخواه از ذرات، تولید شده و ارزیابی می‌شوند. سپس براساس فرآیند تکرار، ذرات به سمت نقطه بهینه حرکت می‌کنند. حرکت هر ذره تابعی از سه عامل حرکت قبلی آن، محل بهترین موقعیتی که تاکنون بوده و بهترین محل مطلق که تاکنون از بین همه ذرات گزارش شده است. شرط توقف الگوریتم می‌تواند سپری شدن تعداد تکرار مشخص یا عدم بهبود قابل توجه در تابع هدف باشد. در این تحقیق از فرم ساده این الگوریتم با تنظیمات بهینه ارائه شده

$$Z = \text{Min} \left( \sum_{j=1}^{n_j} (p_j^{EPA} - p_j)^r \right) \quad [2]$$

$$P_{1 \times n_j} = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_j \ \dots \ p_{n_j}] \quad [3]$$

$$0 \leq p_j \leq p^{max} \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, n_j \quad [4]$$

$$Q_j^{avl} = \text{PDR}(p_j) \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, n_j \quad [5]$$

$$[p_1^{EPA} \ p_2^{EPA} \ \dots \ p_j^{EPA} \ \dots \ p_{n_j}^{EPA}] = \text{EPANET}(Q_1^{avl} \ Q_2^{avl} \ \dots \ Q_j^{avl} \ \dots \ Q_{n_j}^{avl}) \quad [6]$$

در این روابط Z تابع هدف، n<sub>j</sub> تعداد گره‌های تقاضا در شبکه و P بردار متغیرهای تصمیم مسئله (فشار در هر گره) است. مطابق رابطه (۴)، محدوده متغیرهای تصمیم بین صفر و فشار حداکثر (p<sup>max</sup>) است. تابع PDR نمایانگر رابطه بین فشار و دبی تقاضای گره در روش تحلیل مبتنی بر فشار است. تابع EPANET نیز شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET را نشان می‌دهد.

Node	Q_req (l/s)	P (m) [DDA]	P (m) [PDA]	Q_avl (l/s)	
1	1	0	0	0	
2	2	20.8000	83.1900	88.6300	20.8000
3	3	20.8000	57.1400	72.5500	20.8000
4	4	20.8000	83.1900	88.6300	20.8000
5	5	20.8000	56.8200	73.2400	20.8000
6	6	20.8000	-20.2500	41	20.8000
7	7	20.8000	57.1400	72.5500	20.8000
8	8	20.8000	-20.2500	41	20.8000
9	9	62.5000	-177.4600	16.5500	22.8800

شکل ۱. سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای تحلیل مبتنی بر فشار

ضریب هیزن ویلیامز و طول کلیه لوله‌ها به ترتیب برابر ۱۳۰ و ۱۰۰۰ متر است. فشار حداقل و فشار مطلوب به ترتیب صفر و ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. برای بررسی این مثال، سه سناریوی مختلف در نظر گرفته شده است که شامل: (۱) مقایسه مدل‌های موجود، (۲) مقایسه نتایج حاصل از روابط مختلف بین فشار و دبی گره‌ای و (۳) مقایسه همگرایی الگوریتم‌های دیگر با روش ارائه شده، می‌شود.

در سناریوی اول، شبکه با استفاده از EPANET به روش مبتنی بر تقاضا تحلیل شده و نتایج آن با مدل‌های مختلف تحلیل مبتنی بر فشار شامل EPANET-EMITTER، CWSNET، روش HDA (۲۴)، WaterNetGen، ماژول تحلیل مبتنی بر فشار در WaterGEMS، EPANET-IMNO، و روش ارائه شده در این پژوهش (PSO-PDA) مقایسه شده است. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، نتایج تحلیل مبتنی بر تقاضا (EPANET)، غیر واقعی است. علت ایجاد چنین فشارهای بزرگ منفی، الزام الگوریتم برای تأمین دبی تقاضای هر گره به‌طور کامل است. درحالی‌که در عمل، به نسبت فشاری که در هر گره موجود است، دبی تقاضای مورد نیاز آن تأمین خواهد شد. در این مثال حتماً باید از تحلیل مبتنی بر فشار استفاده کرد تا نتایج واقعی حاصل شود. مقایسه مقادیر دبی قابل

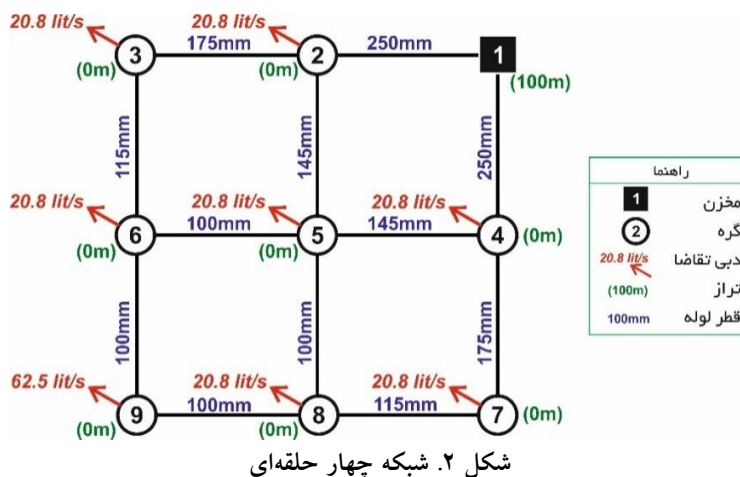
توسط کلرک و کندی (۲۲) استفاده شده است. جهت تسریع همگرایی، یکی از ذرات اولیه براساس مقادیر فشار گره‌ای تحلیل مبتنی بر تقاضا تعریف می‌شود. در این راستا از آنجایی که ممکن است فشار ناشی از تحلیل مبتنی بر تقاضا در برخی گره‌ها منفی باشد، مقدار صفر برای آن گره‌ها در نظر گرفته می‌شود.

### سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری

در این مقاله با بهره‌گیری از روش ارائه شده و برنامه‌نویسی در محیط MATLAB که به‌صورت پویا به EPANET متصل شده است، رابط کاربری گرافیکی به‌عنوان سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مطابق شکل (۱) توسعه داده شده است. در این مدل، پس از فراخوانی فایل شبکه با فرمت inp از طریق کلید OPEN و تنظیم پارامترهای حد قابل قبول خطا (تلورانس)، تعداد تکرار، فشار حداقل، فشار مطلوب و نوع رابطه تحلیل مبتنی بر فشار، تحلیل مسئله صورت می‌گیرد و نتایج به کاربر ارائه می‌شود.

### نتایج و بحث

جهت بررسی عملکرد مدل ارائه شده، شبکه چهار حلقه‌ای مطابق شکل (۲) که توسط تابش (۲۳) ارائه شد، تحلیل می‌شود.



جدول ۲. مقادیر فشار بر حسب متر و دبی بر حسب لیتر بر ثانیه در گره‌ها براساس نتایج سناریوی اول

شماره گره									پارامتر	مدل
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
-۱۷۷/۵	-۲۰/۳	۵۷/۱	-۲۰/۳	۵۶/۸	۸۳/۲	۵۷/۱	۸۳/۲	۸۳/۲	فشار	EPANET
۶۲/۵	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی تقاضا	
۵/۳	۳۶/۷	۷۱/۴	۳۶/۷	۷۲/۰	۸۸/۲	۷۱/۴	۸۸/۲	۸۸/۲	فشار	EPANET-EMITTER
۲۶/۲	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی موجود	
۵/۸	۳۹/۸	۶۸/۱	۳۹/۸	۶۹/۱	۸۵/۸	۶۸/۱	۸۵/۸	۸۵/۸	فشار	CWSNET
۲۷/۴	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی موجود	
۵/۳	۳۶/۷	۷۱/۴	۳۶/۷	۷۲/۰	۸۸/۲	۷۱/۴	۸۸/۲	۸۸/۲	فشار	HDA
۲۶/۲	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی موجود	
۵/۳	۳۶/۷	۷۱/۴	۳۶/۷	۷۲/۰	۸۸/۲	۷۱/۴	۸۸/۲	۸۸/۲	فشار	WaterNetGen
۲۶/۲	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی موجود	
۵/۳	۳۶/۷	۷۱/۴	۳۶/۷	۷۲/۰	۸۸/۲	۷۱/۴	۸۸/۲	۸۸/۲	فشار	WaterGEMS-PDA
۲۶/۲	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی موجود	
۵/۳	۳۶/۷	۷۱/۴	۳۶/۷	۷۲/۰	۸۸/۲	۷۱/۴	۸۸/۲	۸۸/۲	فشار	EPANET-IMNO
۲۶/۲	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی موجود	
۵/۳	۳۶/۷	۷۱/۴	۳۶/۷	۷۲/۰	۸۸/۲	۷۱/۴	۸۸/۲	۸۸/۲	فشار	PSO-PDA
۲۶/۲	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی موجود	

مدل PSO-PDA برای انجام تحلیل مبتنی بر فشار استفاده شد و نتایج در جدول (۳) ارائه شده است. هرچند اختلاف نتایج چندان زیاد نیست، رابطه گوپتا و بی‌هاو کمترین و رابطه توسیاری و همکاران، بیشترین مقدار فشار را برای گره ۹

تامین و فشار در هر گره براساس مدل ارائه شده در این تحقیق و سایر مدل‌ها نشان می‌دهد که می‌توان از PSO-PDA به‌عنوان مدل قابل اعتماد استفاده کرد. در سناریوی دوم، با استفاده از روابط مختلف جدول (۱)، از

جدول ۳. مقادیر فشار بر حسب متر و دبی بر حسب لیتر بر ثانیه در گره‌ها براساس نتایج سناریوی دوم

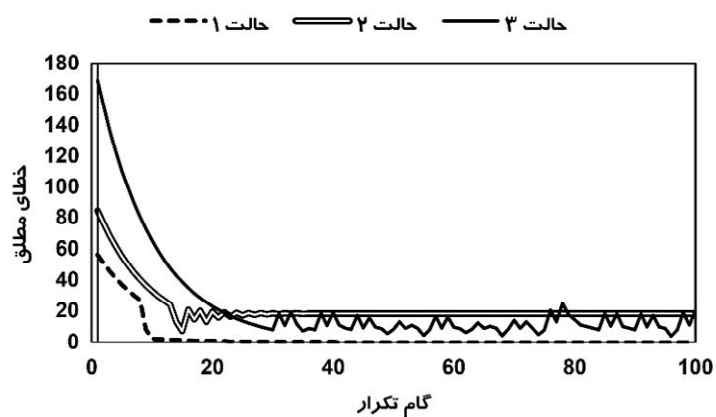
شماره گره								پارامتر	رابطه بین فشار و دبی موجود در گره
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲		
۱۶/۶	۴۱/۰	۷۲/۶	۴۱/۰	۷۳/۲	۸۸/۶	۷۲/۶	۸۸/۶	فشار	گرمانوپولوس
۲۲/۹	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی تقاضا	
۱/۵	۳۵/۳	۷۱/۰	۳۵/۳	۷۱/۶	۸۸/۱	۷۱/۰	۸۸/۱	فشار	گوپتا و بی‌هاو
۲۷/۳	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی موجود	
۵/۳	۳۶/۷	۷۱/۴	۳۶/۷	۷۲/۰	۸۸/۲	۷۱/۴	۸۸/۲	فشار	واگنر و همکاران
۲۶/۲	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی موجود	
۱۲/۷	۳۹/۵	۷۲/۱	۳۹/۵	۷۲/۸	۸۸/۵	۷۲/۱	۸۸/۵	فشار	فوجیوارا و لی
۲۴/۱	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی موجود	
۱۲/۸	۳۹/۵	۷۲/۲	۳۹/۵	۷۲/۸	۸۸/۵	۷۲/۲	۸۸/۵	فشار	توسیاریلی و همکاران
۲۴/۰	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی موجود	
۱۰/۹	۳۸/۸	۷۲/۰	۳۸/۸	۷۲/۶	۸۸/۴	۷۲/۰	۸۸/۴	فشار	تانویمباه و تمپلمن
۲۴/۶	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	۲۰/۸	دبی موجود	

الگوریتم PSO-PDA به سرعت همگرا می‌شود. در حالت سوم، فقط الگوریتم PSO-PDA همگرا می‌شود و سایر الگوریتم‌ها دچار ناپایداری می‌شوند. لذا PSO-PDA، در بدترین شرایط نیز می‌تواند تحلیل مبتنی بر فشار را به‌خوبی انجام دهد و همگرا شود.

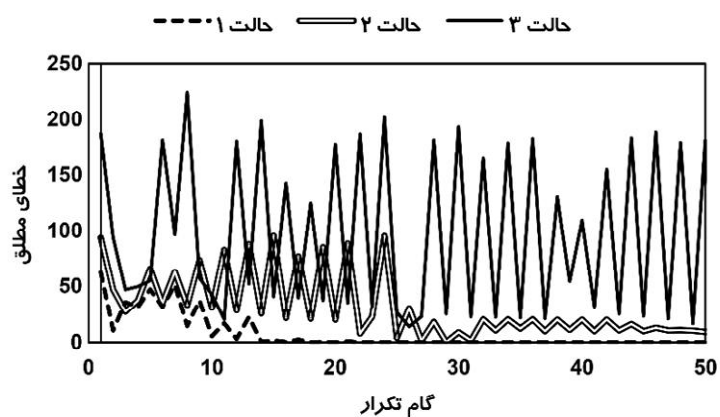
### نتیجه‌گیری

استفاده از تحلیل مبتنی بر تقاضا برای تحلیل شبکه آب در شرایط غیر نرمال از قبیل بارگذاری بیش از حد یا کمبود فشار، می‌تواند فشارهای منفی بیش از حد و غیر واقعی را برای گره‌ها برآورد کند. تحلیل مبتنی بر فشار، حالت کلی تحلیل شبکه است که می‌تواند رفتار شبکه در همه شرایط حتی در شرایط غیر نرمال را به‌خوبی و منطبق بر واقعیت شبیه‌سازی کند. فقط در شرایطی که فشار شبکه به‌طور کامل تامین شده باشد، می‌توان از مدل ساده شده تحلیل مبتنی بر تقاضا استفاده کرد. در تحلیل مبتنی بر فشار، علاوه بر معادلات بقای جرم در گره‌ها و بقای انرژی در حلقه‌ها، لازم است روابط بین فشار موجود و دبی قابل برداشت از هر گره نیز به مجموعه معادلات حاکم اضافه و

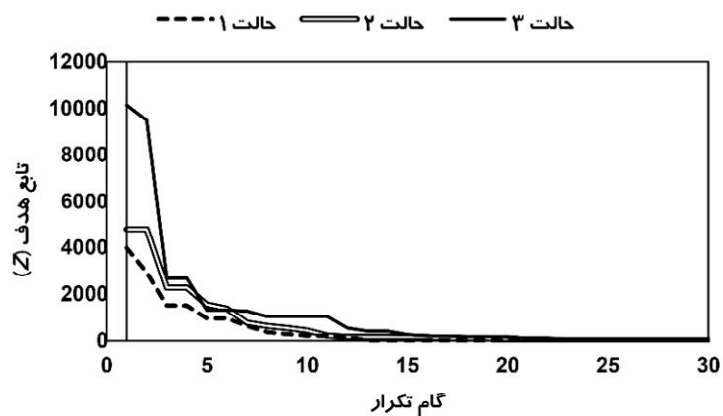
محاسبه می‌کند و علت آن، تفاوت ماهیت روابط مختلف است. در سناریوی سوم، همگرایی سه الگوریتم مختلف انجام تحلیل مبتنی بر فشار شامل الگوریتم ارائه شده توسط شکوهی و همکاران (۲۵)، الگوریتم روش EPANET-IMNO و الگوریتم ارائه شده در پژوهش حاضر (PSO-PDA)، مقایسه شده است. بدین منظور مسئله در سه حالت مختلف برای دبی تقاضای گره‌ها تحلیل شده است: (۱) مقادیر دبی تقاضای واقعی که در شکل (۲) نمایش داده شده‌اند، (۲) مقادیر دبی مذکور با ۵۰ درصد افزایش در همه گره‌ها و (۳) سه برابر مقادیر دبی تقاضای واقعی در هر گره است، هرچند مقادیر فرض شده در حالت دو و سه، بسیار زیاد و غیر منطقی است، ولی الگوریتم تحلیل مبتنی بر فشار باید بتواند در هر شرایطی، شبکه را به‌درستی تحلیل کرده و همگرا شود. شکل (۳) روند همگرایی الگوریتم در این سه حالت را مقایسه کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر سه الگوریتم در حالت اول، به‌خوبی و با سرعت مناسب همگرا می‌شوند. در حالت دوم همگرایی الگوریتم شکوهی و همکاران با مشکل مواجه شده و همگرایی الگوریتم EPANET-IMNO هم بسیار کند است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳. مقایسه نتایج سناریوی سوم براساس الگوریتم‌های: (الف) شکوهی و همکاران، (ب) EPANET-IMNO و (ج) PSO-PDA



مقایسه شد. نتایج نشان داد مدل توسعه داده شده (PSO-PDA)، به خوبی می‌تواند شبیه‌سازی مبتنی بر فشار را انجام دهد و در برخی شرایط، همگرایی بهتری نیز دارد. استفاده از روابط مختلف بین فشار و دبی قابل برداشت گره‌ای نیز بررسی شد و مشخص شد، اختلاف زیادی بین نتایج آنها مشاهده نمی‌شود. رابط کاربری گرافیکی در محیط MATLAB طراحی شد تا بتوان از PSO-PDA به سادگی در عمل نیز استفاده کرد.

به‌طور هم‌زمان حل شوند. روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران برای انجام تحلیل مبتنی بر فشار توسعه داده شده است. در این پژوهش، حل معادلات حاکم به صورت مسئله بهینه‌سازی مدل و از EPANET به عنوان شبیه‌ساز هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا در کنار روابط بین فشار و دبی قابل برداشت گره‌ای استفاده شد. از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل این مسئله استفاده و نتایج آن با برخی مدل‌های موجود

### منابع مورد استفاده

1. Bentley Systems. 2014. WaterGEMS V8i user's manual, Watertown, USA.
2. Clerc, M. and J. Kennedy. 2002. The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6(1): 58-73.
3. Fujiwara, O. and J. Li. 1998. Reliability analysis of water distribution networks in consideration of equity, redistribution, and pressure-dependent demand. *Water Resources Research* 34(7): 1843-1850.
4. Germanopoulos, G. 1985. A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. *Civil Engineering Systems* 2(3): 171-179.
5. Guidolin, M., P. Burovskiy, Z. Kapelan and D. A. Savić. 2010. CWSNET: an object-oriented toolkit for water distribution system simulations. Water Distribution Systems Analysis, Tucson, AZ, USA.
6. Gupta, R. 2015. History of pressure-dependent analysis of water distribution networks and its applications. In: Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress: Floods, Droughts, and Ecosystems, Austin, Texas.
7. Gupta, R., A. Awale, A. Markam and P. R. Bhawe. 2005. Node flow analysis of water distribution networks using gradient method. In: Proceedings of the National conference on advances in water engineering for sustainable development, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, PP: 207-214.
8. Gupta, R. and P. R. Bhawe. 1996. Comparison of methods for predicting deficient network performance. *Journal of Water Resources Planning and Management* 122(3): 214-217.
9. He, P., T. Tao, K. Xin, S. Li and H. Yan. 2015. Modelling water distribution systems with deficient pressure: an improved iterative methodology. *Water Resources Management* 30(2): 593-606.
10. Kennedy, J. and R. C. Eberhart. 1995. Particle swarm optimization. In: Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, New Jersey, USA.
11. Moosavian, S. A. and M. R. Jaefarzadeh. 2013. Pressure-driven demand and leakage simulation for pipe networks using differential evolution. *World Journal of Engineering and Technology* 1(3): 49-58.
12. Morley, M. S. and C. Tricarico. 2014. Pressure-driven demand extension for EPANET (EPANETpdd). Technical report No. 2008/02, Centre for water systems, University of Exeter, Devon, England.
13. Muranho, J., A. Ferreira, J. Sousa, A. Gomes and A. S. Marques. 2014. Pressure-dependent demand and leakage modelling with an EPANET extension – WaterNetGen. *Procedia Engineering* 89: 632-639.
14. Muranho, J., A. Ferreira, J. Sousa, A. Gomes and A. Sá Marques. 2010. WaterNetGen - an EPANET extension for automatic water distribution networks models generation and pipe sizing. *Water Science and Technology: Water Supply* 12(1): 117-123.
15. Pathirana, A. 2010. EPANET2 desktop application for pressure driven demand modeling. In: Proceeding of the Water distribution systems analysis, Tuscon, AZ, USA.
16. Rossman, L. A. 2000. EPANET 2 user's manual, United states environmental protection agency, Cincinnati, USA.
17. Rossman, L. A. 2011. An overview of EPANET version 3.0, In: Proceeding of the Water distribution systems analysis, Tucson, AZ, USA.
18. Shokoohi, M., M. Tabesh, S. Nazif and M. Dini. 2016. Water quality based multi-objective optimal design of water distribution systems. *Water Resources Management* 31(1): 93-108.
19. Suribabu, C. R. 2015. Emitter based approach for estimation of nodal outflow to pressure deficient water distribution networks under pressure management. *Scientia Iranica* 25(5): 1765-1778.
20. Tabesh, M. 1998. Implications of the pressure dependency of outflows of data management, mathematical

- modelling and reliability assessment of water distribution systems. PhD. Thesis, University of Liverpool.
21. Tabesh, M., A. Shirzad, V. Arefkhani and A. Mani. 2013. A comparative study between the modified and available demand driven based models for head driven analysis of water distribution networks. *Urban Water Journal* 11(3): 221-230.
  22. Tabesh, M., T. T. Tanyimboh and R. Burrows. 2002. Head-driven simulation of water supply networks. *International Journal of Engineering* 15(1): 11-22.
  23. Tanyimboh, T. T. and A. B. Templeman. 2010. Seamless pressure-deficient water distribution system model. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management* 163(8): 389-396.
  24. Tucciarelli, T., A. Criminisi and D. Termini. 1999. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(3), 277-285.
  25. Wagner, J., U. Shamir and D. Marks. 1988. Water distribution reliability: simulation methods. *Journal of Water Resources Planning and Management* 114(3): 276-294.

## Pressure Dependent Analysis in Water Distribution Networks Using Particle Swarm Optimization

M. A. Geranmehr\*, M. R. Chamani and K. Asghari<sup>1</sup>

(Received: January 6-2017 ; Accepted: August 2-2017)

### Abstract

A water distribution network (WDN) may not be able to satisfy all required demands when it's in the pressure deficit mode or under over-loaded demand conditions. Analysis of the network in this mode requires pressure dependent analysis (PDA). Unlike demand driven analysis (DDA), PDA needs an extra equation for every node to relate the nodal demand and the nodal pressure; so it should be solved with the other network's equations simultaneously. In this paper, based on the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, a decision support system has been developed by using MATLAB and EPANET for PDA simulation in WDNs. A four-loop network selected from the literature was analyzed using different scenarios and different pressure dependent functions presented by the previous investigations. The results showed that the proposed model (PSO-PDA) was as accurate as the previous ones and provided better convergence. The results of the nodes' pressure and discharge also indicated minor differences obtained by different PDA functions. However, the differences between the results of PDA and DDA were considerable.

**Keywords:** Decision support system, Pressure dependent analysis, Water distribution networks, Particle swarm optimization

---

1. Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: mgeranmehr@gmail.com