

# Analysis of Hydraulic Stress Effects on the Performance of Water Distribution Networks Using Interval Analysis and Optimization Approach

A. Moradi Sabzkouhi<sup>1</sup>, A. Haghghi<sup>2</sup>

1. PhD Candidate, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

2. Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran  
(Corresponding Author) a.haghghi@scu.ac.ir

(Received Sep. 10, 2017 Accepted May 7, 2018)

## To cite this article :

Moradi Sabzkouhi, A., Haghghi, A., 2019, "Analysis of hydraulic stress effects on the performance of water distribution networks using interval analysis and optimization approach." Journal of Water and Wastewater, 30(3), 1-16. Doi: 10.22093/wwj.2018.97826.2487. (In Persian)

## Abstract

Hydraulic analysis of pipe networks is generally done considering certain values for independent parameters of the system such as roughness of pipes, nodal demands, etc. Such analysis would inevitably lead to certain hydraulic responses of the system, i.e. nodal pressures, etc. This is while, inherent uncertainties associated with independent parameters as expected stresses, spread over the system and result in hydraulic stress in nodal pressure heads as dependent uncertainties. Using optimization tools, this study presents a reliable approach based on interval analysis to deal with these uncertain hydraulic stresses. In the proposed approach, the optimization problem is formulated in a manner that the nodal demands, roughness of pipes and water levels in elevated tanks would be the decision variables while extreme nodal pressures for unknown intervals are explored as the objectives functions. The large number of junctions in the case of real pipe networks, leads to inefficient iterative use of single objective optimization engine. In order to this problem, this study exploits a many-objective approach with an appropriate performance. Applying the proposed approach on a real pipe network shows that  $\pm 15\%$  variation in nodal demands and pipes' roughness in addition to  $\pm 1\text{m}$  in water levels might produce hydraulic stress in pressure heads from  $-13.7\%$  to  $+10.2\%$  with regard to the crisp values. In such a condition, it is possible for 125 junctions out of 128, to fail in satisfying the minimum required pressure head. It is demonstrated that the proposed approach has acceptable accuracy for analyzing hydraulic stress in real water distribution networks.

**Keywords:** Hydraulic Stress, Uncertainty, Interval Analysis, Water Distribution Network Analysis, Many Objective Optimization.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۳، صفحه: ۱۶-۱

## تحلیل اثر تنش‌های هیدرولیکی بر عملکرد شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تحلیل فاصله و رویکرد بهینه‌سازی

عادل مرادی سبزوکی<sup>۱</sup>، علی حقیقی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(نویسنده مسئول) a.haghighi@scu.ac.ir

پذیرش ۹۷/۲/۱۷

(دریافت ۹۶/۶/۱۹)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

مرادی سبزوکی، ع.، حقیقی، ع.، ۱۳۹۸، "تحلیل اثر تنش‌های هیدرولیکی بر عملکرد شبکه‌های توزیع آب با استفاده از تحلیل فاصله و رویکرد

بهینه‌سازی" مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۳)، ۱۶-۱. Doi: 10.22093/wwj.2018.97826.2487

### چکیده

در تحلیل هیدرولیک شبکه خطوط لوله، پارامترهای مستقل شبکه از جمله زبری لوله‌ها و تقاضای گره‌ها عموماً به صورت مقادیر قطعی تلقی می‌شوند. این رویکرد برخورد قطعی، به ناچار به حصول نتایج قطعی برای پاسخ‌های هیدرولیکی شبکه از جمله هد فشاری گره‌ها منجر خواهد شد. این در حالی است که در واقعیت، ذات غیرقطعی بسیاری از این پارامترها سبب می‌شود که تغییرات قابل انتظار آنها در قالب تنش، در شبکه منتشر شده و بروز عدم قطعیت و تنش در پاسخ‌های هیدرولیکی شبکه را به دنبال داشته باشد. برای تحلیل این تنش‌ها در پژوهش حاضر به ارائه یک رویکرد بر مبنای روش تحلیل فاصله و استفاده از بهینه‌سازی به عنوان ابزار حل مسئله پرداخته شد. در این روش، بهینه‌سازی به گونه‌ای فرموله شد که مصارف گرهی، زبری لوله‌ها و تراز آب در مخازن هوایی متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله تعریف شده و بازه نامعلوم فشار هر یک از گره‌های شبکه به عنوان اهداف مسئله جستجو شود. از سوی دیگر، تعداد زیاد گره‌های مصرف و اجرای تعداد زیادی مدل بهینه‌سازی تک هدفه به صورت متوالی، زمان زیادی را می‌طلبد. برای رفع این معضل، در این پژوهش از یک روش بهینه‌سازی چندهدفه با کارایی مناسب استفاده شد. اجرای روش پیشنهادی روی یک شبکه واقعی مورد مطالعه نشان داد که اعمال ۱۵ درصد تنش در تقاضای گره‌ها و زبری لوله‌ها و ۱ متر در تراز سطح آب مخازن هوایی، باعث ایجاد تنش هیدرولیکی در هد فشاری گره‌ها از ۱۳/۷- تا ۱۰/۲ درصد نسبت به هد فشار قطعی می‌شود به طوری که در عمل امکان شکست برای تأمین حداقل فشار مجاز طراحی در ۱۲۵ گره از ۱۲۸ گره مصرف وجود دارد. نتایج نشان داد که روش ارائه شده در این پژوهش از دقت قابل قبولی در تحلیل تنش‌های هیدرولیکی شبکه برخوردار است.

**واژه‌های کلیدی:** تنش هیدرولیکی، عدم قطعیت، تحلیل فاصله، تحلیل شبکه‌های توزیع آب، بهینه‌سازی چندهدفه

### ۱- مقدمه

سامانه‌های آبرسانی در دهه‌های اخیر توجه زیادی را به خود معطوف نموده است. در حالی که رویکرد کلاسیک تحلیل هیدرولیکی شبکه‌ها، اعتمادپذیری و دیگر شاخص‌های عملکردی شبکه‌های توزیع آب شهری را قطعی در نظر می‌گیرد، این شاخص‌ها

شبکه‌های توزیع آب بخش مهمی از سامانه‌های آبرسانی هستند که قریب ۷۰ درصد از کل هزینه‌های سامانه را به خود اختصاص می‌دهند (Sadat Maki, 2014). از این رو به دلیل صرف هزینه زیاد در بخش توزیع آب، اعتمادپذیری شبکه‌های توزیع آب در



لوله‌ها است. در این پژوهش، از مفهوم عدم قطعیت به صورت معادل برای توصیف تنش هیدرولیکی استفاده شده است.

با توجه به این که شبکه‌های آبرسانی از نظر عملکردی متشکل از اجزای به هم مرتبطی هستند، وقوع هر یک از تنش‌های سه دسته فوق سبب می‌شود که این تنش‌ها به صورت سیستماتیک در اجزای شبکه منتشر شده و پاسخ‌های هیدرولیکی شبکه از جمله فشار در گره‌ها را دچار تنش نماید. به عبارت دیگر تنش‌های مستقل وارده به یک سامانه آبرسانی در قالب معادلات حاکم بر هیدرولیک شبکه در سامانه منتشر شده و پاسخ‌های هیدرولیکی شبکه را متأثر می‌سازد (Revelli and Ridolfi, 2002, Haghghi and Zahedi Asl, 2014)

از این اثرگذاری در سامانه‌های پیچیده مهندسی، به انتشار عدم قطعیت<sup>۳</sup> تعبیر می‌شود. آنچه در بحث انتشار اثر تنش در شبکه اهمیت دارد، یافتن ویژگی‌های پاسخ‌های هیدرولیکی شبکه در ازای تنش‌هایی با ویژگی‌های معلوم است که در پارامترهای مستقل سامانه ممکن است رخ دهد. بر این اساس در این پژوهش تلاش شد تا اثرات تنش‌های هیدرولیکی ناشی از پارامترهای توزیع آب مدل‌سازی شود و ضمن ارائه یک راه حل نظام‌مند برای کمی‌ساختن این اثرات، محدوده تغییرات مورد انتظار پاسخ‌های هیدرولیکی شبکه تحت این تنش‌ها تعیین شود. در روش پیشنهادی این پژوهش، بازه تغییرات پاسخ‌های هیدرولیکی با استفاده از روش تحلیل فاصله مدل‌سازی شد. به این منظور برای یافتن هر یک از حدود بالا و پایین فاصله تغییرات پاسخ‌ها، یک مسئله بهینه‌سازی تعریف شد که پارامترهای مستقل شبکه، متغیرهای تصمیم‌گیری و پاسخ مورد نظر، تابع هدف آن باشد. با توجه به تعدد پاسخ‌های شبکه و زمان‌بر بودن فرایند بهینه‌سازی مجزای هر هدف،

در این پژوهش از یک روش جدید مبتنی بر بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شد. روش مورد نظر در این پژوهش برخلاف برخی روش‌های موجود که محدودیت‌هایی ناشی از پیش فرض‌های تحلیل فاصله دارند، برای کاربرد در انواع سامانه‌های مهندسی عمومیت بیشتری دارد.

تئوری احتمالات برای سال‌های متمادی اصلی‌ترین رویکرد برای تحلیل عدم قطعیت در سامانه‌های مهندسی بوده است. در بین

تحت عدم قطعیت و تنش در پارامترهای هیدرولیکی ماهیت غیرقطعی دارد لازم است انتشار اثرات آنها در بروز تنش در پاسخ‌های هیدرولیکی شبکه، تحلیل شود. شناسایی تنش‌های هیدرولیکی، ترسیم اثرات آنها برای بهره‌برداران و تلاش برای تعدیل این اثرات در فاز بهره‌برداری و در صورت امکان، لحاظ آنها در فاز طراحی از اهمیت بالایی برخوردار است. عدم لحاظ تأثیر تنش‌های هیدرولیکی، سبب می‌شود که اعتمادپذیری به دست آمده در روش‌های کلاسیک تحلیل شبکه، در اثر بروز یک تنش بحرانی یا ترکیبی از تنش‌ها به راحتی از حدود استاندارد خارج شده و عملکرد سامانه دچار اختلال شود.

به‌طور کلی مهم‌ترین تنش‌های هیدرولیکی در شبکه‌های آبرسانی را می‌توان در سه دسته کلی طبقه‌بندی نمود: دسته اول شامل تنش‌هایی است که باعث تغییر پیش‌بینی نشده در تقاضای آب گره‌ها می‌شوند؛ از آن جمله به مشترکان پرمصرف و انشعابات غیرمجاز، نشتی آب و شکستگی‌های بزرگ می‌توان اشاره نمود. دسته دوم تنش‌هایی هستند که ظرفیت هیدرولیکی لوله‌ها را دستخوش تغییر قرار می‌دهند؛ عواملی همچون تغییر در زبری جداره لوله‌ها، انسداد<sup>۱</sup> لوله‌ها و عملکرد نامطلوب شیرآلات در این دسته جای می‌گیرند. نهایتاً دسته سوم مربوط به تنش‌هایی است که به واسطه تغییر در وضعیت هیدرولیکی تجهیزات تأمین‌کننده فشار رخ می‌دهد؛ عدم کارکرد مطلوب پمپ‌ها، تغییرات شدید سطح آب مخازن متعادل‌کننده از جمله علل بروز تنش‌های هیدرولیکی دسته سوم می‌باشند.

در ادبیات فنی علوم مرتبط با مهندسی سامانه‌ها، عدم قطعیت<sup>۲</sup> به معنی تغییر در مقادیر کمی پارامترهای تأثیرگذار در یک سامانه است. به بیان دقیق‌تر، عدم قطعیت مربوط به فقدان اطلاعات درست در ارتباط با یک پدیده، فرایند یا داده‌های درگیر در تعریف و تحلیل یک مسئله است (Tung and Yen, 2005) و به صورت ساده می‌تواند رخداد پدیده‌هایی که خارج از کنترل آدمی است، تعریف شود (Mays and Tung, 1992). بروز هر یک از عوامل مرتبط با تنش‌های هیدرولیکی سه‌گانه در یک سامانه آبرسانی که پیش از این معرفی شد، در واقع نتیجه تغییر در یک یا چند پارامتر مستقل ورودی به مدل تحلیلی شبکه از جمله تقاضای گرهی و زبری

<sup>3</sup> Uncertainty Propagation

<sup>1</sup> Blockage

<sup>2</sup> Uncertainty



حدی فشار گره مفروض  $z_j$  یعنی  $[P_j, \bar{P}_j]$  را نتیجه دهد. به بیان ساده‌تر برای فشار گرهی  $P_j$  معادله زیر برقرار است

$$\begin{aligned} P_j &= \varphi \left( (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_{np})_{P_j}, D \right) \\ \bar{P}_j &= \varphi \left( (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_{np})_{\bar{P}_j}, D \right) \\ \text{so that: for } i &= 1 \text{ to } np \quad a_i \in [\underline{a}_i, \bar{a}_i] \end{aligned} \quad (1)$$

که در این معادله

$D$  قطر لوله‌های شبکه،  $(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_{np})_{P_j}$  ترکیب بحرانی پارامترهای سامانه برای حصول  $P_j$ ،  $(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_{np})_{\bar{P}_j}$  ترکیب بحرانی پارامترهای سامانه برای حصول  $\bar{P}_j$  تعداد پارامترهای سامانه و  $\varphi$  مدل تحلیل‌گر جریان ماندگار شبکه آبرسانی است که در این پژوهش (Rossmann, 2000) EPANET در نظر گرفته شده است.  $D$  در معادله ۱ به منظور تأکید بر وابستگی  $[P_j, \bar{P}_j]$  به سناریو قطر لوله‌ها است. روش‌های متعددی برای پیاده‌سازی روش تحلیل فاصله وجود دارد که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود.

#### الف) روش شمارش ترکیبات<sup>۳</sup>

در این روش با فرض همنا<sup>۴</sup> بودن رابطه پاسخ‌های هیدرولیکی در برابر تغییرات پارامترهای ورودی به سامانه، حصول نقاط حدی پاسخ‌های شبکه در نقاط حدی پارامترهای ورودی در نظر گرفته می‌شود. از این رو کلیه ترکیبات حدی ممکن از پارامترهای ورودی شمارش شده و برای هر ترکیب یکبار مدل هیدرولیکی فراخوانی شده و  $[P_j, \bar{P}_j]$  تعیین می‌شود (Sivakumar et al., 2014). اجرای این روش در شرایطی که شبکه دارای  $np$  پارامتر مستقل ورودی باشد، مستلزم فراخوانی مدل هیدرولیکی شبکه به تعداد  $2^{np}$  است که از این نظر در شبکه‌های واقعی این رویکرد عملاً غیر قابل اجراست.

#### ب) تحلیل فاصله بر مبنای بسط سری تیلور

اگر  $P_j$  یک تابع چند متغیره از متغیرهای  $a = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_{np})$  باشد، بسط سری تیلور برآورد

روش‌های این رویکرد، روش شبیه‌سازی مونت کارلو<sup>۱</sup> بسیار بیش از روش‌های احتمالاتی دیگر مورد توجه بوده است (Bargiela and Hainsworth, 1989, Bao and Mays, 1990, Duan et al., 2010, Seifollahi-Aghmiuni et al., 2013)

این روش نیازمند اندازه‌گیری‌های متعدد و داده‌های تجربی برای تعیین توابع توزیع احتمال عدم قطعیت‌های ورودی به سامانه و محاسبات سنگین تکراری برای یافتن توابع توزیع احتمال پاسخ‌های خروجی است که در شبکه‌های واقعی بسیار پرهزینه و طاقت فرسا است (Branisavljevic and Ivetic, 2006, Haghghi and Zahedi Asl, 2014)

از سوی دیگر تنوری مجموعه‌های فازی که اولین بار توسط عسگرزاده (Asgarzade, 1965) معرفی شد نیز می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد جایگزین در تحلیل عدم قطعیت سامانه‌های مهندسی استفاده شود. این رویکرد مستلزم به‌کارگیری یک روش بهینه‌سازی برای حصول توابع عضویت پاسخ‌هاست که بر این اساس پژوهشگران مختلف روش‌های متفاوتی را استفاده نموده‌اند (Revelli and Ridolfi, 2002, Haghghi, 2015, Haghghi and Zahedi Asl, 2014, Haghghi and Keramat, 2012, Sabzkouhi and Haghghi, 2016, Sivakumar et al., 2016)

اجرای هر دو رویکرد فوق مستلزم داشتن اطلاعات کافی از ویژگی‌های آماری یا فازی پارامترهای مستقل سامانه است که در بیشتر مسائل دنیای واقعی دستیابی به آنها به سادگی امکان‌پذیر نیست.

#### ۲- رویکرد تحلیل فاصله برای تحلیل تنش‌های هیدرولیکی

علاوه بر دو رویکرد قبلی، از جمله ساده‌ترین رویکردهای موجود در زمینه تحلیل غیرقطعی، تحلیل فاصله<sup>۲</sup> است (Rao and Berke, 1997).

در رویکرد IA، حداقل اطلاعات از عدم قطعیت پارامترهای ورودی که شامل بازه تغییرات پارامترهاست، مورد نیاز است. در این رویکرد اگر  $a_i$  پارامتر مستقل نام سامانه آبرسانی باشد، با داشتن فاصله معلوم تغییرات  $a_i$  یعنی  $[\underline{a}_i, \bar{a}_i]$ ، دو ترکیب بحرانی از پارامترهای سامانه مورد نظر است به طوری که هر یک، فاصله

<sup>3</sup> Combinatorial Approach

<sup>4</sup> Monotonic

<sup>1</sup> Monte Carlo Simulation Method

<sup>2</sup> Interval Analysis (IA)



بزرگ‌تر خطای بیشتری دارند. به‌منظور کاهش خطای مورد اشاره، در پژوهش حاضر روش تحلیل فاصله به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی تعریف و با استفاده از یک مدل توسعه داده شده چندهدفه، بهینه‌سازی الگوریتم اجتماع ذرات<sup>۱</sup> حل شد. در این برنامه‌ریزی ریاضی، هر یک از فشارهای گرهی به‌عنوان تابع هدف و پارامترهای شبکه به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شود.

### ۳- هیدرولیک شبکه‌های آبرسانی

قوانین حاکم بر هیدرولیک جریان ماندگار شبکه‌های آبرسانی شامل قانون پیوستگی جریان در گره‌ها و قانون بقای انرژی در حلقه‌ها است. پیوستگی جریان در هر گره مفروض (j = 1 to N - 1) به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$\sum_{i=1}^{NP(j)} Q_{ij} - q_j = 0 \quad (6)$$

که در آن

$Q_{ij}$  دبی لوله  $ij$  متصل‌کننده گره  $i$  به گره  $j$ ،  $NP(j)$  تعداد لوله‌های متصل به گره  $j$ ،  $q_j$  دبی تقاضا در گره  $j$  و  $N$  تعداد کل گره‌های موجود در شبکه است. همچنین برای هر حلقه مفروض  $i$  (i = 1 to NL) قانون بقا انرژی در حلقه‌ها به‌صورت زیر است

$$\sum_{j=1}^{NP(i)} h_{ij} - \sum_{j=1}^{NP(i)} HP_{ij} = 0 \quad (7)$$

که در آن

$h_{ij}$  افت انرژی در لوله  $ij$  حلقه  $i$ ،  $HP_{ij}$  انرژی اضافه شده توسط پمپ در لوله  $ij$  حلقه  $i$ ،  $NP(i)$  تعداد لوله‌های موجود در حلقه  $i$  و  $NL$  تعداد کل حلقه‌های اصلی شبکه است.

معادلات بقای جرم و انرژی از طریق یک معادله بیان‌کننده مقاومت در برابر حرکت جریان (معادله استهلاک انرژی) به یکدیگر مرتبط می‌شوند. معادلات دارسی و ایسباخ<sup>۲</sup> و هیزن ویلیامز<sup>۳</sup> مدل‌های معروف‌تری برای این منظور هستند، اگرچه مدل

تقریبی این تابع در همسایگی نقطه معلوم  $a^c = (a_1^c, a_2^c, \dots, a_i^c, \dots, a_{np}^c)$  بر مبنای تقریب خطی و با در نظر گرفتن  $a_i, a_i^c \in [\underline{a}_i, \bar{a}_i]$  عبارت است از

$$P_j = \varphi(a^c, D) + (a - a^c) \cdot \nabla \varphi(a, D) \quad (2)$$

$$\Rightarrow P_j = \varphi(a^c, D) + \sum_{i=1}^{np} (a_i - a_i^c) \left. \frac{\partial \varphi}{\partial a_i} \right|_{a_i^c} \quad (3)$$

بر این اساس برای حد پایین و بالای برآورد  $P_j$ ، به ترتیب معادلات ۴ و ۵ برقرار است

$$P_j = \varphi(a^c, D) - \sum_{i=1}^{np} \left| \Delta a_i \left( \frac{\partial \varphi}{\partial a_i} \right)_{a_i^c} \right| \quad (4)$$

$$\bar{P}_j = \varphi(a^c, D) + \sum_{i=1}^{np} \left| \Delta a_i \left( \frac{\partial \varphi}{\partial a_i} \right)_{a_i^c} \right| \quad (5)$$

که در آن

$\Delta a_i = \bar{a}_i - a_i^c = a_i^c - \underline{a}_i$  قابل ذکر است که به دلیل ماهیت غیرخطی معادلات هیدرولیک جریان، روش‌های الف و ب که تغییرات فشارهای گرهی را نسبت به پارامترهای شبکه، هم‌نوا در نظر می‌گیرند در شرایط مختلف عدم قطعیت، دقت‌های متفاوتی خواهند داشت (Sabzkouhi and Haghghi, 2016). این دقت بستگی به بزرگی بازه تغییرات پارامترهای شبکه و نقطه‌ای است که حول آن مشتق‌گیری عددی می‌شود، دارد. گوپتا و همکاران در سال ۲۰۰۷ بر مبنای تحلیل فاصله با بسط سری تیلور روشی را پیشنهاد دادند که در آن بر مبنای نوع هم‌نوایی (صعودی یا نزولی) تغییرات پاسخ مفروض  $P_j$  نسبت به هر پارامتر مستقل، کران مناسب آن پارامتر انتخاب شده و حداقل و حداکثر پاسخ با قرار دادن ترکیب بحرانی کران‌های مناسب، به‌دست می‌آید (Gupta and Behave, 2007).

### ج) تحلیل فاصله با استفاده از بهینه‌سازی

همانگونه که در قسمت قبل تشریح شد، هر دو روش شمارش ترکیبات و روش‌های مبتنی بر بسط سری تیلور به‌دلیل فرض هم‌نوایی تغییرات پاسخ‌ها نسبت به پارامترها در عدم قطعیت‌های

<sup>1</sup> Many Objective Particle Swarm Optimization

<sup>2</sup> Darcy-Weisbach

<sup>3</sup> Hazen-Williams



#### ۴-۱- کمی‌سازی مفهوم تنش هیدرولیکی

در رویکرد قطعی تحلیل شبکه‌های آبرسانی، هر پارامتر مستقل سامانه،  $a_i$  به صورت یک مقدار قطعی  $a_i^c$  در نظر گرفته می‌شود. در این صورت فشار در هر گره از شبکه،  $P_j$  نیز متناظراً قطعی خواهد بود. در حالی که ماهیت این پارامترها عمدتاً غیرقطعی و غیردقیق بوده و در ساده‌ترین شکل غیرقطعی، تغییرات آن را می‌توان به صورت یک فاصله حداقل - حداکثری  $[a_i, \bar{a}_i]$  در نظر گرفت. در فرم غیر قطعی، تنش در هر پارامتر با یک انحراف منفی  $\Delta a_i^1$  و مثبت  $\Delta a_i^2$  از مقدار قطعی  $a_i^c$  ظاهر می‌شود به طوری که  $[a_i, \bar{a}_i] = [a_i^c - \Delta a_i^1, a_i^c + \Delta a_i^2]$  در واقع  $[a_i, \bar{a}_i]$  نمایش پارامتر  $a_i$  تحت شرایط بروز تنش است. در این پژوهش، مصارف گرهی،  $q$ ، ضریب هیزن-ویلیامز لوله‌ها،  $C$  و سطح آب مخازن تأمین کننده فشار،  $R$  پارامترهای عامل تنش بوده و در فرایند بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم در نظر گرفته می‌شوند. از این نظر برای هر گره مصرف  $z$ ، فاصله  $[q_z, \bar{q}_z]$ ، برای هر لوله  $i$ ،  $i = 1$  to  $M$  فاصله  $[C_i, \bar{C}_i]$  و برای هر مخزن ذخیره  $k$ ،  $k = 1$  to  $NR$  فاصله  $[R_k, \bar{R}_k]$  به عنوان بازه تنش‌های ورودی معلوم، تعریف می‌شوند.  $M$ ،  $N$  و  $NR$  به ترتیب تعداد گره‌ها، لوله‌ها و مخازن ذخیره شبکه هستند. محدوده تنش‌های اشاره شده غالباً از طریق نتایج کالیبراسیون لوله‌های مشابه، قضاوت‌های کارشناسی، آمار و تجارب قبلی بهره‌برداران و آزمون‌های آزمایشگاهی تعیین شده و در مسئله حاضر، معلوم فرض شده‌اند.

#### ۴-۲- پاسخ شبکه به تنش‌های هیدرولیکی

در شرایط تنش که پارامترهای سامانه آبرسانی در یک فاصله حداقل - حداکثری متغیر هستند، می‌توان انتظار داشت فشار هر گره  $z$  نیز متناظراً<sup>۲</sup> در یک فاصله حداقل - حداکثری تغییر نمایند. روش تحلیل فاصله به دنبال یافتن بازه مجهول پاسخ‌های شبکه (فشارهای گرهی) با داشتن بازه معلوم پارامترها است. به بیان روشن‌تر در تحلیل فاصله:  $[P_z, \bar{P}_z] \Rightarrow [a_i, \bar{a}_i]$ ، با توجه به این که مدل‌های هیدرولیکی با مقادیر قطعی پارامترهای سامانه و پاسخ‌ها سروکار دارند، بدیهی است قادر نخواهند بود به تنهایی بازه تنش در فشارهای گرهی را به دست آورند.

هیزن ویلیامز برای جریان سیال آب، به دلیل سادگی کاربرد، عمومیت بیشتری در شبکه‌های توزیع آب دارد. ارتباط بین دبی جریان لوله،  $Q_{ij}$ ، و افت اصطکاکی،  $h_{ij}$ ، به صورت معادله تجربی زیر بیان می‌شود

$$h_{ij} = \frac{\omega L_{ij} Q_{ij}^\alpha}{C_{ij}^\alpha D_{ij}^\beta} \quad (8)$$

که در آن

$C_{ij}$  ضریب هیزن ویلیامز لوله،  $L_{ij}$  طول لوله و  $D_{ij}$  قطر لوله می‌باشد. همچنین ضرایب  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\omega$  به صورت تجربی تعیین می‌شوند که در سامانه متریک به ترتیب معادل  $۱۰/۶۶۷$ ،  $۴/۸۷$ ،  $۱/۸۵۲$  می‌باشند.

معادلات بقای جرم در گره‌ها و بقای انرژی در حلقه‌ها در کنار معادله مقاومت جریان یک سامانه از معادلات غیرخطی را تشکیل می‌دهند که در آنها  $Q$  دبی لوله‌های شبکه و  $H$  انرژی در گره‌ها مجهول هستند و لازم است یک روش مناسب برای حل این معادلات انتخاب شود. در این پژوهش از مدل ریاضی EPANET که از روش حل گرادیان<sup>۱</sup> (Todini and Pillati, 1987) برای حل معادلات بهره می‌گیرد، برای شبیه‌سازی و حل معادلات شبکه استفاده شد.

#### ۴- مواد و روش‌ها

به منظور تحلیل تنش‌های هیدرولیکی به روش تحلیل فاصله، در این پژوهش رویکرد استفاده از بهینه‌سازی ارائه می‌شود. مسئله شامل یافتن  $[P_z, \bar{P}_z]$  یعنی بازه تغییرات فشار در تمام گره‌های شبکه، با فرض بازه معلوم تغییرات پارامترهای شبکه شامل تقاضای آب در گره‌ها، زبری هیزن-ویلیامز لوله‌ها و سطح آب در مخازن به عنوان متغیرهای تصمیم است. بهینه‌سازی در این رویکرد یک ابزار برای حل مسئله بوده و برنامه‌ریزی آن را به دو شیوه بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه می‌توان انجام داد. هر دو شیوه کلیات مشابهی دارد ولی در اجرا تفاوت‌هایی با هم دارند. در ادامه ابتدا کلیات رویکرد بهینه‌سازی و سپس گام‌های اصلی شیوه بهینه‌سازی چندهدفه بیان می‌شود.

<sup>2</sup> Crisp Values

<sup>1</sup> Gradient Method

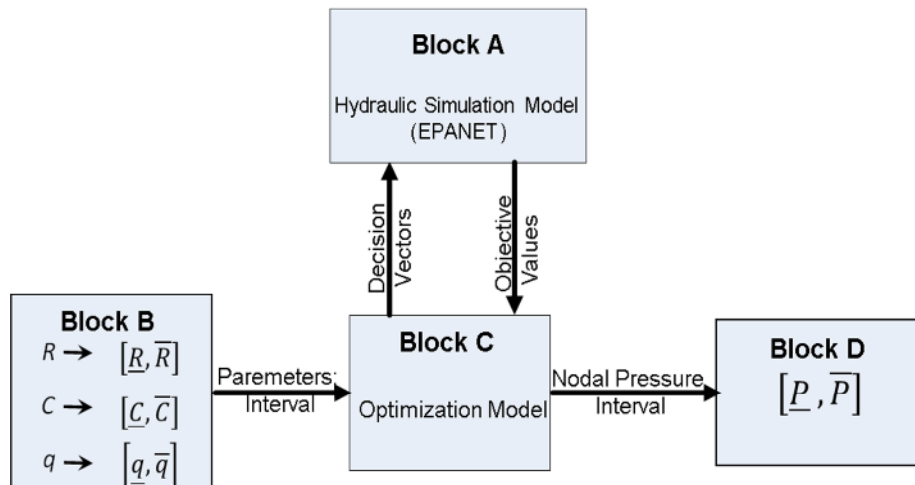


Fig.1. A conceptual description of IA model for uncertain analysis of a WDN using the optimization approach  
شکل ۱- توصیف مفهومی مدل IA برای تحلیل غیرقطعی یک شبکه آبرسانی با استفاده از بهینه‌سازی

(۹)

Maximize or Minimize:  $P_j = \varphi(R_{1 \times NR}, C_{1 \times M}, q_{1 \times N})$

Subject to:

$$\begin{cases} \underline{R}_{1 \times NR} \leq R_{1 \times NR} \leq \bar{R}_{1 \times NR} \\ \underline{C}_{1 \times M} \leq C_{1 \times M} \leq \bar{C}_{1 \times M} \\ \underline{q}_{1 \times N} \leq q_{1 \times N} \leq \bar{q}_{1 \times N} \end{cases}$$

D- دو مسئله بهینه‌سازی فوق با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی مناسب حل شده و  $\underline{P}_j$  و  $\bar{P}_j$  تعیین می‌شوند.

چنانچه در نظر باشد که هر کدام از توابع هدف مورد بحث با بهینه‌سازی تک هدفه بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی شود، با وجود N گره در سامانه، اجرای مدل تحلیل تنش فوق برای کل شبکه مستلزم انجام 2N بهینه‌سازی تک هدفه متوالی مجزا از هم است. بدیهی است چنانچه تحلیل تنش در شبکه‌های واقعی بزرگ با صدها گره مدنظر باشد، اجرای این رویکرد بسیار وقت‌گیر و به لحاظ محاسباتی پرهزینه است. این در حالی است که در این رویکرد با هر اجرای EPANET عملاً فشار در همه گره‌ها (همه اهداف مسئله) ارزیابی می‌شوند ولی به دلیل استفاده از موتور بهینه‌سازی تک هدفه، صرفاً مقدار آن هدف مشخص، مطلوب بوده و مقدار سایر اهداف دور ریخته می‌شود. در حالی که اگر بهینه‌سازی اهداف توأم با هم انجام شود، از محاسبات تکراری مدل شبیه‌سازی استفاده مؤثرتری به عمل می‌آید و با بهینه‌سازی همزمان اهداف، صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان تحلیل تنش نسبت به بهینه‌سازی تک هدفه صورت می‌گیرد. از این رو در این پژوهش از یک مدل توسعه داده شده چند

۳-۴- استفاده از بهینه‌سازی برای یافتن تنش در فشارهای

گرهی

در قسمت قبل مسئله تحلیل فاصله به شکل ساده به صورت  $[a_j, \bar{a}_j] \Rightarrow [P_j, \bar{P}_j]$  بیان شد. در رویکرد استفاده از بهینه‌سازی برای تحلیل فاصله،  $[a_j, \bar{a}_j]$  حدود تغییرات متغیرهای تصمیم‌گیری و  $P_j$  تابع هدف است. در این صورت یافتن  $P_j$  به صورت یک مسئله بهینه‌سازی از نوع حداقل‌سازی و یافتن  $\bar{P}_j$  به صورت یک مسئله بهینه‌سازی از نوع حداکثرسازی تعریف می‌شود. به منظور حل این دو مسئله بهینه‌سازی برای هر فشارگرهی گام‌های زیر با در نظر گرفتن نمودار مفهومی شکل ۱ دنبال می‌شود

A- برای شبکه تحت بررسی ابتدا یک مدل شبیه‌سازی بر مبنای مقادیر قطعی پارامترهای ورودی  $R_k^c, C_i^c, q_j^c$  تشکیل گردیده و شبکه به ازای این مقادیر قطعی تحلیل و متناظراً "مقادیر قطعی پاسخ‌ها  $P_j^c$  (فشارهای گرهی) محاسبه می‌شود (بلوک A در شکل ۱).

B- برای هر پارامتر  $R_k, C_i, q_j$  بازه حداقل - حداکثری پارامتر با استفاده از روش‌های مذکور مشخص می‌شود (بلوک B در شکل ۱).

C- برای تعیین مقادیر حدی هر فشارگرهی  $P_j$ ، دو مسئله بهینه‌سازی شکل می‌گیرد که در آنها مقادیر  $C, q$  و  $R$  متغیرهای تصمیم‌گیری و حداقل‌سازی و حداکثرسازی  $P_j$  تابع هدف این دو مسئله خواهند بود (بلوک C در شکل ۱). فرم عمومی برنامه‌ریزی ریاضی فوق به شکل زیر است



بهینه برای کل اجزای  $\Phi$  جستجو می‌کند. با پذیرش اصول کلی الگوریتم استاندارد PSO (Kennedy and Eberhart, 1995). مراحل اصلی کار در MOPSO با توجه به فلوچارت ارائه شده آن در شکل ۲ به شرح زیر است (Sabzkouhi and Haghghi, 2016)

گام اول) جمعیت اولیه بهینه‌سازی شامل PS عضو تولید می‌شود. موقعیت و سرعت اولیه ذرات به ترتیب با ماتریس‌های  $X_{PS \times W}$  و  $V_{PS \times W}$  بیان می‌شود. W تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله تحلیل تنش می‌باشد ( $W = NR + M + N$ ).

گام دوم) به ازای هر یک از افراد جمعیت، مدل شبیه‌سازی EPANET فراخوانی شده و بر اساس نتایج آن، ماتریس برانزندی  $F_{PS \times N}$  شکل می‌گیرد. ماتریس برانزندی به تعداد اهداف مسئله تحلیل تنش (N) دارای ستون است.

گام سوم) در ازای هر یک از اهداف مسئله در ستون مربوط به آن در  $F_{PS \times N}$  یک رتبه از ۱ تا PS به هر ذره اختصاص یافته و ماتریس رتبه‌بندی  $K_{PS \times N}$  تشکیل می‌شود.

گام چهارم) در تکرار t ام الگوریتم برای هر هدف  $P_j$ ، موقعیت بهترین ذره،  $Gbest_t^{P_j}$  و برای هر ذره PS، بهترین موقعیت نسبت به هدف  $P_j$ ،  $Pbest_{ps,t}^{P_j}$  به روز رسانی شود. در صورتی که همگرایی حاصل شده باشد، الگوریتم متوقف می‌شود، در غیر این صورت گام پنجم آغاز می‌شود.

گام پنجم) برای هر هدف بهینه‌سازی یک گروه تشکیل شده و افراد جمعیت به طور مساوی بین این گروه‌ها تقسیم می‌شوند. به این منظور با توجه به رتبه‌های احراز شده در  $K_{PS \times N}$  بهترین ذره هر هدف مستقیماً به گروه آن هدف ارسال می‌شود. برای سایر افراد گروه، بین ذرات تورنمنت برگزار شده و ذره‌ای که برای هدف مربوطه، بهترین رتبه را در  $K_{PS \times N}$  دارد، در تورنمنت انتخاب شده و به گروه آن هدف ارسال می‌شود.

گام ششم) سرعت ذرات و موقعیت آنها بر اساس معادلات زیر به روز رسانی می‌شود

$$V_{ps,t} = \theta V_{ps,t-1} + c_1 r_1 (Pbest_{ps,t}^{P_j} - X_{ps,t-1}) + c_2 r_2 (Gbest_t^{P_j} - X_{ps,t-1}) \quad (11)$$

$$X_{ps,t} = X_{ps,t-1} + V_{ps,t} \quad (12)$$

هدف الگوریتم اجتماع ذرات<sup>۱</sup> (Sabzkouhi and Haghghi, 2016) برای بهینه‌سازی همزمان کلیه اهداف فوق استفاده می‌شود.

#### ۴-۴- مدل بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم اجتماع ذرات MOPSO

مدل MOPSO در سال ۲۰۱۶ توسط Sabzkouhi and Haghghi برای تحلیل فازی شبکه‌های آبرسانی توسعه یافت. استفاده از الگوریتم‌های چند هدفه برای حل تعداد زیادی مسئله بهینه‌سازی تک هدفه (همچون تحلیل عدم قطعیت و تنش) زمانی امکان‌پذیر است که دو شرط اساسی زیر برقرار باشد (Sabzkouhi and Haghghi, 2016; Haghghi and Zahedi Asl, 2014):

۱- کلیه اهداف دارای متغیرهای تصمیم و فضای تصمیم‌گیری یکسانی باشند. با توجه به یکسان بودن محدوده تغییرات پارامترهای شبکه برای همه فشارهای گرهی، این ویژگی در مسئله این پژوهش وجود دارد.

۲- کلیه اهداف باید با یک تابع برانزندی مشابه، ارزیابی شوند. در مسئله پژوهش حاضر، با هر بار اجرای EPANET برای هر بردار تصمیم‌گیری، کلیه فشارهای گرهی محاسبه می‌شوند.

فرم ریاضی بیان مسئله در رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه به صورت زیر است

$$\text{Maximize or Minimize: } \phi = \varphi(S) \quad (10)$$

where  $\phi = [P_1, P_2, \dots, P_N]^T$  and  $S =$

$$\begin{bmatrix} R_{11}, \dots, R_{1NR}, & C_{11}, \dots, C_{1M}, & q_{11}, \dots, q_{1N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{N1}, \dots, R_{NNR}, & C_{N1}, \dots, C_{NM}, & q_{N1}, \dots, q_{NN} \end{bmatrix}_{N \times (NR+M+N)}$$

$$\text{subject to: } \begin{cases} \underline{R}_{1 \times NR} \leq R_{1 \times NR} \leq \bar{R}_{1 \times NR} \\ \underline{C}_{1 \times M} \leq C_{1 \times M} \leq \bar{C}_{1 \times M} \\ \underline{q}_{1 \times N} \leq q_{1 \times N} \leq \bar{q}_{1 \times N} \end{cases}$$

برخلاف رویکرد تک هدفه که در آن فقط یک تابع هدف و یک بردار تصمیم‌گیری بهینه وجود دارد، در رویکرد چندهدفه با توجه به معادله ۱۰، بردار اهداف تصمیم‌گیری  $\phi$ ، شامل N عضو و ماتریس تصمیم‌گیری S، دارای N سطر و  $NR + M + N$  ستون (تعداد پارامترهای شبکه) است. MOPSO در فضای متغیرهای تصمیم مسئله، ماتریس تصمیم‌گیری بهینه S را برای حصول مقادیر

<sup>1</sup> Many Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)



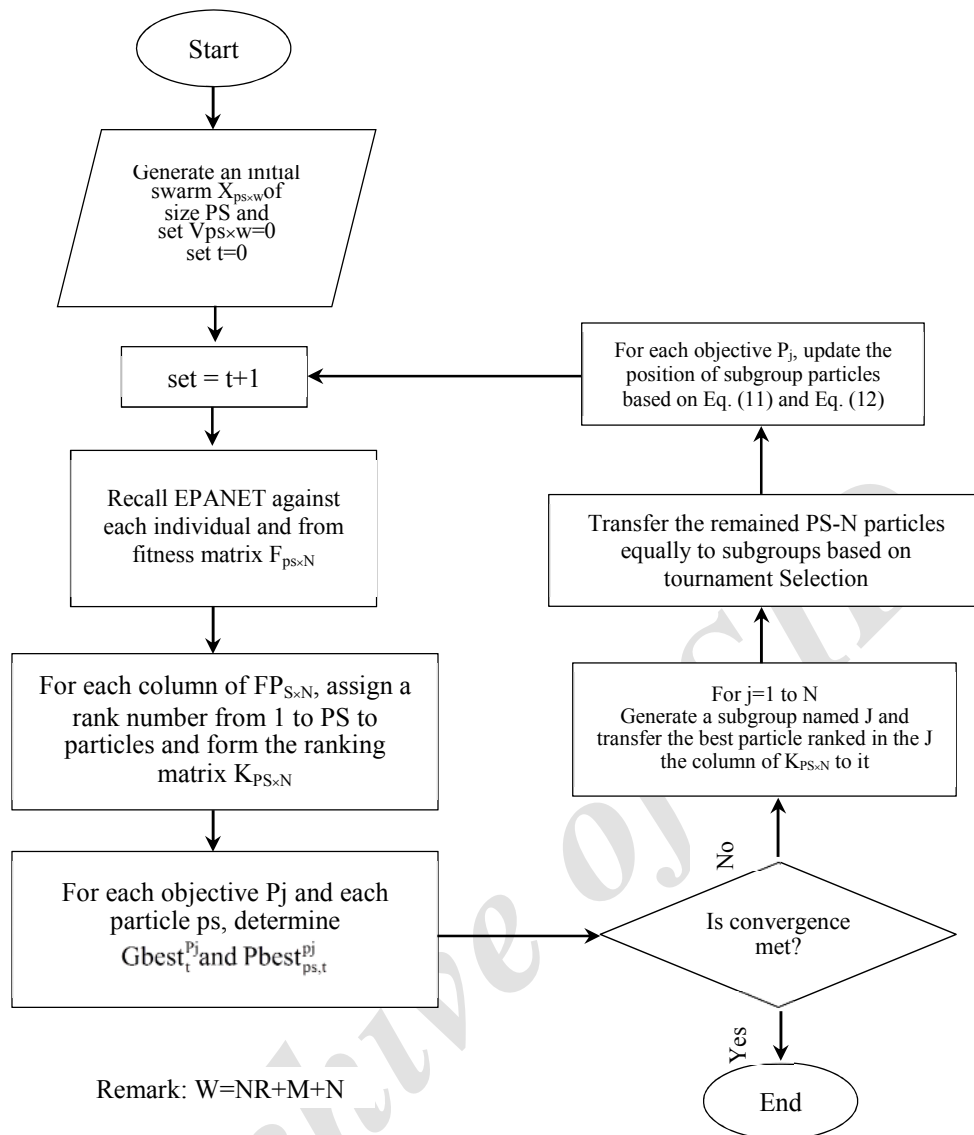


Fig. 2. The process of many objective optimization based on MOPSO Algorithm

شکل ۲- روند بهینه‌سازی چند هدفه بر اساس الگوریتم MOPSO

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱- شبکه مورد مطالعه

شبکه مثال موردی در نظر گرفته شده در این پژوهش، مربوط به روستای مریچه در حومه غربی شهر رامهرمز در استان خوزستان است. پیکربندی شبکه و موقعیت گره‌های آن در شکل ۳ نشان داده شده است. شبکه متشکل از ۱۲۸ گره مصرف بوده که از طریق ۱۴۵ لوله پلی‌اتیلن PE80 و PN6 ATM با ضریب هیزن ویلیامز قطعی ۱۲۲ تغذیه شده و حداکثر نیاز لحظه‌ای ۲۵/۷۹ لیتر در ثانیه بین

که در این معادلات

$V_{ps,t}$  و  $X_{ps,t}$  به ترتیب سرعت و موقعیت ذره  $ps$  در تکرار  $t$ ام،  $\theta$  ضریب اینرسی<sup>۱</sup>،  $c_1$  و  $c_2$  به ترتیب ضریب یادگیری فردی<sup>۲</sup> و اجتماعی<sup>۳</sup> و  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی نرمال هستند. پس از به روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات، به گام دوم بازگشته و این روند جستجو تا حصول همگرایی ادامه می‌یابد.

<sup>1</sup> Inertia Rate

<sup>2</sup> Individual Learning Rate

<sup>3</sup> Social Learning Rate



این گره‌ها توزیع می‌شود. اراضی شبکه کاملاً هموار و بدون تغییرات ارتفاعی قابل توجه بوده و تأمین دبی و فشار در شبکه از طریق سه مخزن هوایی با ارتفاع ثابت آب ۲۰ متر در نقاط حاشیه‌ای شبکه صورت می‌گیرد. همچنین حداقل فشار مجاز در طراحی شبکه معادل ۱۸ متر ستون آب در نظر گرفته شده است. جداول ۱ و ۲ به ترتیب نحوه بارگذاری جریان تقاضا در گره‌های مصرف و مشخصات لوله‌ها را ارائه می‌نمایند.

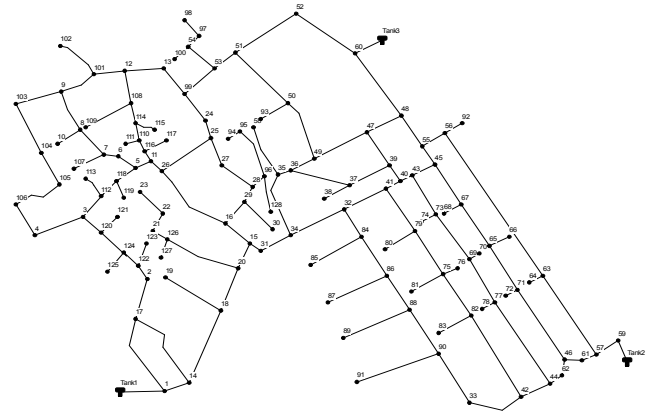


Fig. 3. Network layout for the case study and the location of junctions and tanks

شکل ۳- پیکربندی شبکه مثال موردی و موقعیت گره‌ها و مخازن هوایی

#### ۵-۲- اعمال تنش به پارامترهای مستقل شبکه

در سناریو مورد نظر برای اعمال تنش به شبکه، وقوع توأمان ۱۵

#### جدول ۱- مقادیر قطعی مصارف گرهی در شبکه مطالعه موردی

Table 1. Crisp nodal demands for the case study

Node ID	Nodal Demand (LPS)	Node ID	Nodal Demand (LPS)	Node ID	Nodal Demand (LPS)	Node ID	Nodal Demand (LPS)	Node ID	Nodal Demand (LPS)	Node ID	Nodal Demand (LPS)
1	0	26	0.61	51	0.97	76	0.21	101	0.27	126	0
2	0.37	27	0.22	52	0	77	0.19	102	0.09	127	0.22
3	0.31	28	0.16	53	0	78	0.21	103	0	128	0.04
4	0.09	29	0	54	0.2	79	0.24	104	0.53		
5	0.14	30	0.13	55	0	80	0.29	105	0.17		
6	0	31	0.09	56	1	81	0.28	106	0.09		
7	0.12	32	0.1	57	0	82	0.21	107	0.21		
8	0.18	33	0	58	0.19	83	0.7	108	0		
9	0.2	34	0.33	59	0	84	0.1	109	0.18		
10	0.3	35	0.26	60	0	85	0.43	110	0		
11	0.01	36	0.24	61	0.53	86	0.14	111	0.2		
12	0.12	37	0.24	62	0	87	0.64	112	0		
13	0.12	38	0.16	63	0.36	88	0.14	113	0		
14	0	39	0	64	0.21	89	0.74	114	0.43		
15	0	40	0.19	65	0.42	90	0.44	115	0.12		
16	0.48	41	0.07	66	0.24	91	0.37	116	0		
17	0.69	42	0	67	0	92	0.31	117	0.12		
18	0.22	43	0.05	68	0.15	93	0.18	118	0		
19	0.52	44	0	69	0.07	94	0.13	119	0.13		
20	0.18	45	0.19	70	0.15	95	0	120	0		
21	0.03	46	0	71	0.21	96	0.09	121	0.13		
22	0	47	0.35	72	0.24	97	0	122	0.54		
23	0.87	48	0.95	73	0.1	98	0.14	123	0.16		
24	0	49	0.21	74	0.14	99	0	124	0		
25	0.46	50	0.69	75	0	100	0.08	125	0.11		



## جدول ۲- جزئیات لوله‌ها در شبکه مطالعه موردی

Table 2. Pipe data for the case study

Pipe ID	Start Node	End Node	Length h(m)	Diamet er(mm)	Pipe ID	Start Node	End Node	Length h(m)	Diamet er(mm)	Pipe ID	Start Node	End Node	Length h(m)	Diamet er(mm)	Pipe ID	Start Node	End Node	Length h(m)	Diamet er(mm)
1	3	4	84.4	75	38	39	40	33.5	75	74	67	68	36.6	63	109	99	24	58.2	90
2	5	6	40.8	75	39	40	41	27.4	125	75	69	70	34.7	75	110	53	99	65.8	125
3	6	7	23.2	90	40	41	32	77.4	75	76	65	71	86.9	75	111	54	100	32.0	75
4	7	8	57.9	63	41	40	43	18.6	110	77	71	46	144.5	75	112	12	101	49.7	90
5	8	9	75.0	75	42	43	45	43.6	90	78	71	72	34.4	63	113	101	102	75.6	63
6	8	10	65.5	75	43	39	47	68.0	90	79	43	73	85.6	75	114	101	9	63.4	75
7	5	11	23.8	75	44	47	48	62.2	125	80	73	69	89.3	63	115	9	103	76.5	75
8	12	13	63.7	90	45	47	49	96.9	63	81	73	74	36.6	63	116	103	104	93.3	75
9	1	14	47.5	140	46	49	36	51.8	75	82	75	76	35.4	75	117	104	105	65.5	75
10	15	16	53.3	75	47	49	50	110.0	75	83	69	77	86.0	63	118	105	106	83.5	75
11	1	17	184.7	90	48	50	51	124.1	75	84	77	44	169.2	75	119	106	4	61.9	75
12	17	2	92.0	90	49	51	52	163.1	125	85	77	78	37.8	75	120	7	107	80.8	75
13	14	17	153.9	90	50	51	53	44.2	110	86	41	79	89.0	75	121	108	12	58.5	63
14	14	18	137.8	110	51	53	54	57.6	75	87	79	75	89.3	63	122	108	109	85.3	75
16	18	19	106.1	75	52	48	55	64.0	110	88	79	80	58.2	63	123	110	111	33.8	63
15	18	20	80.2	63	53	55	45	37.8	110	89	75	81	60.4	75	124	3	112	52.7	75
17	20	15	48.5	90	54	55	56	43.9	75	90	75	82	86.0	63	125	112	113	45.4	75
18	21	22	34.4	110	55	35	58	100.3	63	91	82	42	172.5	75	126	110	114	22.9	75
19	22	23	56.7	110	56	Res1	1	99.7	125	92	82	83	61.9	63	127	114	108	43.9	75
20	24	25	32.0	90	57	Res2	59	69.5	110	31	32	84	56.4	75	128	114	115	31.7	75
21	16	26	161.8	75	58	59	57	64.9	110	94	84	85	96.0	63	129	11	116	12.8	75
22	26	11	15.5	90	59	52	60	136.6	140	93	84	86	81.1	75	130	116	110	19.8	63
23	25	26	104.9	75	60	60	48	133.2	125	96	86	87	106.7	63	131	116	117	33.8	63
24	25	27	51.2	75	61	Res3	60	35.7	200	95	86	88	69.2	75	132	112	118	11.0	75
25	27	28	66.1	75	62	57	61	25.9	110	98	88	89	118.3	75	133	118	5	59.7	75
26	28	29	19.2	63	63	61	46	28.3	125	97	88	90	91.7	90	134	118	119	39.0	75
27	29	16	55.5	75	64	46	62	32.9	110	99	90	33	116.4	110	135	120	3	40.8	90
28	29	30	75.9	63	65	62	44	19.5	110	100	90	91	140.8	63	136	120	121	53.0	63
29	15	31	22.3	90	66	44	42	45.7	110	101	56	92	32.9	75	137	2	122	28.0	110
30	31	34	47.9	75	67	42	33	88.7	110	102	50	93	67.1	63	139	122	123	50.9	110
32	34	32	105.8	63	68	56	63	298.4	63	103	94	95	23.5	75	138	122	124	8.8	63
33	34	35	108.8	90	69	63	57	163.7	75	104	95	96	100.0	63	140	124	120	62.2	90
34	35	36	27.7	90	70	63	64	38.1	75	105	96	28	25.6	75	141	124	125	39.3	63
35	36	37	104.2	75	71	65	66	37.5	63	106	54	97	26.2	63	142	20	126	127.4	75
36	37	38	46.9	63	72	45	67	83.2	63	107	97	98	36.3	63	143	126	21	27.4	110
37	37	39	73.2	75	73	67	65	88.7	63	108	13	99	57.3	90	144	126	127	49.1	63
															145	96	128	59.4	63



به‌عنوان معیار همگرایی در این مثال در نظر گرفته شد. شرط اول عدم بهبود بیش از ۱/۰ درصدی توابع هدف در ۱۰ تکرار متوالی و شرط دوم لحاظ حداکثر ۱۰۰ تکرار در کل روند بهینه‌سازی بود. اجرای برنامه با استفاده از یک سیستم رایانه شخصی با مشخصات Core i7 CPU 2.20 GHz RAM 8GB صورت گرفته و ۳/۳۵ ساعت به طول انجامید. در شکل ۴ بازه پاسخ‌های غیرقطعی شبکه در کنار مقادیر قطعی آنها آورده شده است. همان‌گونه که در این نمودار ملاحظه می‌شود تنها ۳ گره از ۱۲۸ گره مصرف تحت شرایط غیرقطعی، معیار حداقل فشار طراحی که در طرح قطعی این شبکه ۱۸ متر بوده، را تأمین می‌کند. به بیان دیگر تحت شرایط ۱۵٪± درصد تنش در مصارف گرهی و زبری لوله‌ها و ۱± متر تراز سطح آب مخازن هوایی طرح، امکان شکست برای تأمین فشار مطلوب در ۱۲۵ گره مصرف وجود خواهد داشت و این موضوع از مقاومت پایین شبکه به تنش‌های هیدرولیکی اعمال شده حکایت دارد. نتایج تحلیل غیرقطعی نشان می‌دهد که تحت سناریوی اعمال تنش فوق، امکان تغییر فشارهای گرهی از ۱۳/۷- تا ۱۰/۲ درصد نسبت به هد فشار قطعی گره‌ها وجود دارد. در این میان متوسط میزان کاهش فشارهای گرهی ۱۱/۹- و متوسط افزایش فشارها ۹/۱۵+ درصد است. همچنین ضریب تغییرات هد فشاری گره‌ها (نسبت به هد فشار قطعی) به‌طور متوسط ۲۱/۱ درصد است که بیشترین مقدار آن مربوط به گره شماره ۱۰۴ با ۲۳/۹ درصد تغییر و کمترین مقدار مربوط به گره شماره ۶۰ با ۱۰/۴۶ درصد است. به بیان روشن‌تر، گره ۶۰ بیشترین مقاومت به تنش‌های هیدرولیکی اعمال شده به شبکه را در بین کل گره‌ها داراست. در این بین گره‌هایی که به مخازن هوایی تغذیه کننده شبکه نزدیک تر هستند، بازه هد فشاری حداقل-حداکثر برای آنها کوچک‌تر است و گره‌هایی که دورترند تنش هیدرولیکی بیشتری در مورد تغییرات فشار تجربه می‌کنند. نمودارهایی مشابه شکل ۴ می‌توانند معیاری برای تشخیص گره‌های حساس‌تر شبکه باشند به طوری که بهره‌برداران با دقت بیشتری تقاضا و مصارف چنین گره‌هایی را در مباحث مدیریت شبکه مدنظر قرار دهند.

#### ۵-۵- صحت‌سنجی نتایج MOPSO

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل این پژوهش، روش پیشنهادی

درصد تغییر در مصارف گرهی و زبری لوله‌ها و ۱± متر تغییر در تراز سطح آب مخازن هوایی شبکه در نظر گرفته شده است. بر این اساس به‌منظور تعیین فاصله تغییرات مصارف گرهی، مقادیر این مصارف در جدول ۲ به میزان ۱۵٪± تغییر یافته تا بازه  $[q_j, \bar{q}_j]$  برای همه گره‌های مصرف ( $j = 1$  to  $N$ ) به‌دست آید. همچنین برای کلیه لوله‌ها ( $i = 1$  to  $M$ )، بازه تغییرات ضریب زبری هیزن ویلیامز  $[C_i, \bar{C}_i] = [103.7, 140.3]$  و برای همه مخازن هوایی  $[R_k, \bar{R}_k] = [19, 21]$  فرض شد. برای این مثال  $N = 128, M = 145, NR = 3$  است.

#### ۵-۳- تنظیمات MOPSO

همانند بیشتر الگوریتم‌های محاسباتی فراکاشی، MOPSO نیز دارای تعدادی پارامتر تنظیمی است که به‌منظور حصول راندمان بهتر در همگرایی الگوریتم، لازم است که قبل از اجرای اصلی واسنجی شود. در این پژوهش از مقادیر پیشنهادی در پژوهش (Sabzkouhi and Haghighi, 2016) برای پارامترهای MOPSO استفاده شد. بر این اساس و با توجه به وجود ۱۲۸ گره مصرف، تعداد توابع هدف بهینه‌سازی  $2 \times 128 = 256$  هدف است که بر اساس پیشنهاد (Sabzkouhi and Haghighi, 2016) جمعیت بهینه‌سازی  $256 \times 6 = 1536$  (۶ ذره در ازای هر هدف) در نظر گرفته شد. به‌علاوه از همین مرجع برای پارامترهای نرخ یادگیری فردی، نرخ یادگیری اجتماعی، حداقل و حداکثر نرخ اینرسی، و فاکتور تغییر مکان به ترتیب مقادیر ۰.۲، ۰.۵، ۱، ۰.۵ و ۰/۶ و انتخاب و در فرایند بهینه‌سازی MOPSO به‌کار گرفته شد. با توجه به این که در شبکه مثال موردی فوق  $N = 128, M = 145$  و  $NR = 3$  است، لذا مسئله دارای  $276 = 3 + 145 + 128$  متغیر تصمیم‌گیری و  $256 = 2 \times 128$  هدف است که با به‌کارگیری MOPSO کلیه این اهداف همزمان بهینه می‌شوند.

#### ۵-۴- نتایج تحلیل فاصله برای فشارهای گرهی

با توجه به تنظیمات ذکر شده در بند قبل، MOPSO اجرا و پس از ۸۱ تکرار و قریب ۱۲۴۰۰۰ بار فراخوانی مدل شبیه‌سازی، همگرایی الگوریتم حاصل شد. با انجام ارزیابی‌های اولیه، دو شرط



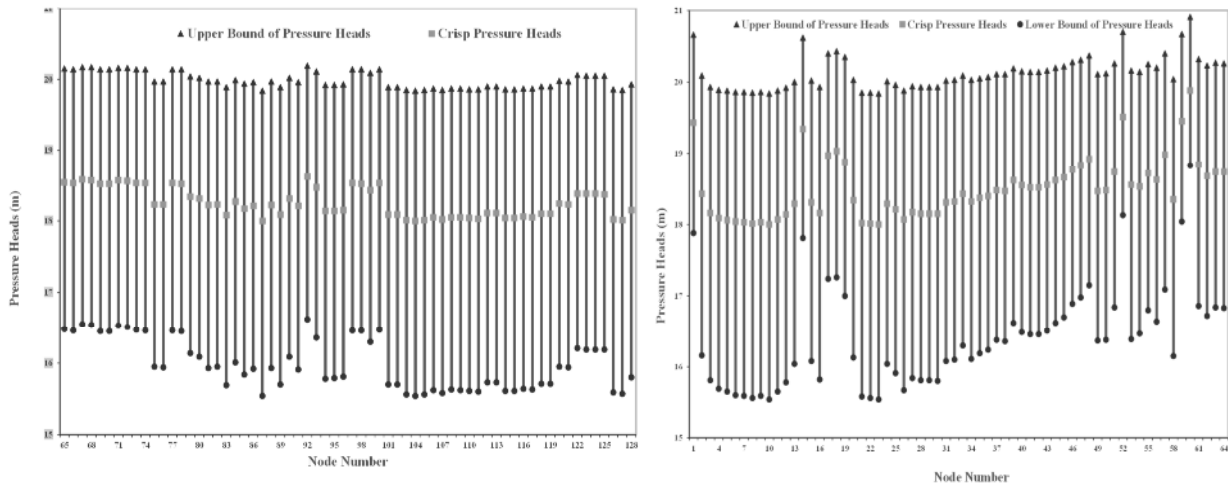


Fig. 4. Results of nodal pressure intervals under the scenario of hydraulic stress

شکل ۴- نتایج بازه تغییرات فشارهای گرهی تحت سناریو تنش هیدرولیکی

بیشتر از روش پیشنهادی (Gupta and Behave 2007) برآورد شده، برای سایر گره‌های مصرف، MOPSO مقادیر حداقل فشار کمتری را محاسبه کرده و از این نظر دقت آن بالاتر است. در مورد فشارهای حداکثر نیز با توجه به شکل ۶، به غیر از گره‌های ۱، ۱۳، ۴۷، ۵۳، ۵۶، ۵۷، ۶۱، ۶۲، ۶۳، ۷۲، ۹۷، ۱۲۳، ۱۲۴ روش پیشنهادی این پژوهش در سایر گره‌های مصرف نتایج دقیق‌تری را نسبت به روش پیشنهادی (Gupta and Behave, 2007) به دست آورده است. نتایج کلی حاکی از دقت بالاتر MOPSO به طور متوسط ۵۳٪ درصد و حداکثر ۳۴٪ درصد نسبت به روش مقابل آن

(Gupta and Behave, 2007) نیز روی شبکه مثال موردی پیاده‌سازی شد و مقادیر حدی فشارهای گرهی در ازای سناریوی تشریح شده برای هر دو روش مورد مقایسه قرار گرفت. در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر فشار گرهی مورد انتظار برای روش پیشنهادی (Gupta and Behave, 2007) و روش پیشنهادی این پژوهش مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌گونه که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود به غیر از گره‌های شماره ۴۷، ۴۸، ۵۶، ۶۲، ۶۳، ۷۲ و ۱۲۴ که در آنها به دلیل تصادفی بودن ماهیت MOPSO، فشارهای حداقل محاسبه شده با این روش قدری

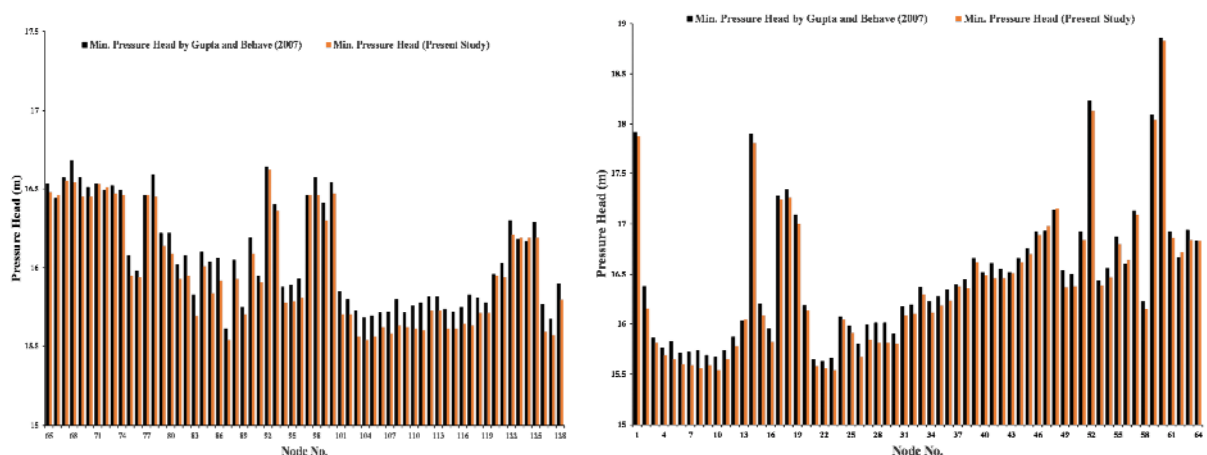
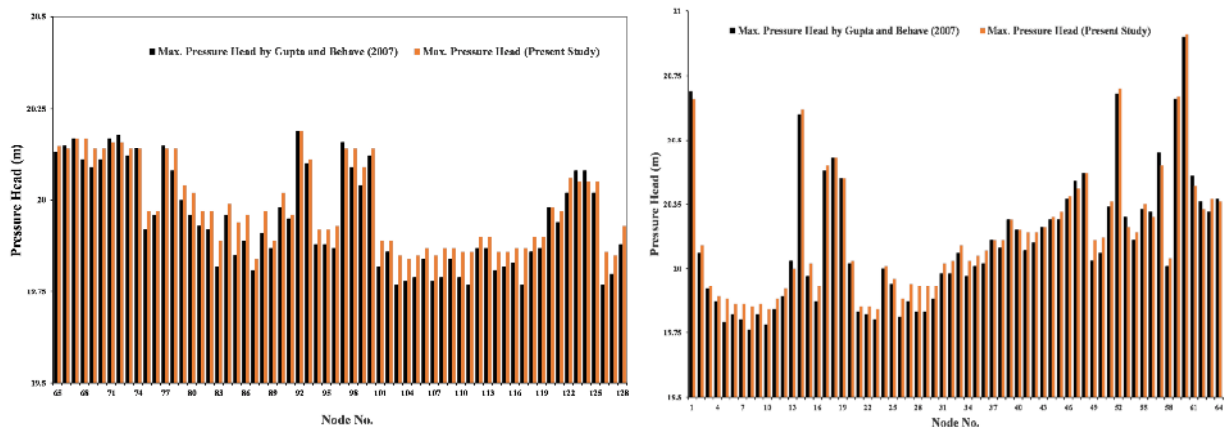


Fig. 5. Comparison of the lower bound of nodal pressures between the proposed method and (Gupta and Behave, 2007)

شکل ۵- مقایسه مقادیر برآوردی حد پایین فشارهای گرهی بر اساس روش پیشنهادی این پژوهش و (Gupta and Behave, 2007)



**Fig. 6.** Comparison of the upper bound of nodal pressures between the proposed method and (Gupta and Behave 2007)

شکل ۶- مقایسه مقادیر برآوردی حد بالای فشارهای گرهی بر اساس روش پیشنهادی این پژوهش و (Gupta and Behave, 2007)

روش‌های برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی<sup>۱</sup> (Revelli and Ridolfi, 2002) و بهینه‌سازی وابسته چند هدفه NSGA-II<sup>۲</sup> اصلاح شده (Haghighi and Zahedi Asl, 2014) قبلاً تأیید شده است (Sabzkouhi and Haghighi, 2016). در کنار نقاط قوت و ضعف روش‌های MOPSO و (Gupta and Behave, 2007)، هر دو معیار سرعت و دقت روش‌های تحلیل تنش در جای خود برای مهندسان ارزشمند هستند. در حالتی که تحلیل تنش صرفاً به منظور شناسایی بازه تنش در پاسخ‌های یک شبکه در حال بهره‌برداری و آگاهی از نقاط ضعف آن انجام شود، چون محدودیت زمان چندانی وجود نداشته و کاربرد زمان واقعی<sup>۳</sup> مدنظر نیست، می‌توان سرعت را فدای دقت نموده و از روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی با دقت بالاتر بهره گرفت. در مقابل در حالتی که تنش به دلایلی همچون کاربرد در مدل‌های طراحی، ارزیابی می‌شود، که در آن سرعت تحلیل تنش در سناریوهای طراحی اهمیت دارد می‌توان دقت را (در حد متعارف) فدای سرعت نمود و از روش (Gupta and Behave, 2007) با سرعت بالاتر بهره جست.

### ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به معرفی یک روش جدید بر مبنای تحلیل فاصله و استفاده از روش‌های بهینه‌یابی چند هدفه برای مدل‌سازی انتشار این تنش‌های هیدرولیکی پرداخته شد. در روش پیشنهادی تنش در

است. اگرچه این اختلاف ناچیز در دقت نتایج دو روش فوق و برتری روش (Gupta and Behave, 2007) در بعد سرعت تحلیل، ارجحیت روش اخیر را از هر نظر القاء می‌کند، ولی پیش فرض رفتار یکنواخت تغییرات پاسخ‌ها در قبال پارامترهای شبکه در روش (Gupta and Behave, 2007) موضوع چالش برانگیزی است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

### ۵-۶- مقایسه روش‌های MOPSO و (Gupta and Behave, 2007)

با توجه به مکانیسم جستجو و تکرار در الگوریتم MOPSO، این روش در مقابل روش (Gupta and Behave, 2007) سرعت کمتری دارد. اگرچه دقت بالاتر MOPSO با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ به طور متوسط ۰/۵۳ درصد و حداکثر ۱/۳۴ درصد، عملاً از دیدگاه مهندسی ارزشمند تلقی نمی‌شود، اما این نتیجه عمومیت نداشته و روش‌های "مبتنی بر فرض هم‌نوایی تغییرات پاسخ‌ها با پارامترهای شبکه" به دلیل ذات غیرخطی معادلات حاکم بر هیدرولیک جریان، بسته به بزرگی یا کوچکی بازه عدم قطعیت پارامترها و همچنین نقطه‌ای که حول آن مشتق‌گیری عددی صورت می‌گیرد، در شرایط مختلف دقت‌های متفاوتی نتیجه می‌دهند (Sabzkouhi and Haghighi, 2016). از این رو نمی‌توان دقت قابل رقابت روش (Gupta and Behave, 2007) در برابر مدل MOPSO را در این مثال در همه موارد انتظار داشت. از سوی دیگر برتری سرعت MOPSO و دقت قابل قبول آن در مقایسه با

<sup>1</sup> Sequential Quadratic Programming

<sup>2</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II

<sup>3</sup> Real-time



تحلیل فاصله استفاده می‌کند، در مقایسه با روش‌های فاقد بهینه‌سازی از نظر زمانی روش پرهزینه‌تری تلقی شده در حالی که به دلیل در نظر گرفتن پیچیدگی‌های غیرخطی معادلات حاکم، به‌طور عمومی از دقت بالاتری برخوردار است. از آنجایی که هر دو عامل دقت و سرعت در تحلیل تنش در شبکه‌های موجود و طراحی و توسعه شبکه‌های جدید حائز اهمیت هستند، استفاده صحیح از هر دو رویکرد در جای مناسب خود توصیه می‌شود.

بدیهی است در شبکه‌ای که به تنش‌های هیدرولیکی حساسیت بالایی دارد، بروز تنش در کمترین سطح ممکن، باعث کاهش اعتمادپذیری شبکه و کاهش سطح سرویس‌دهی به پایین‌تر از حداقل مطلوب می‌شود. در این مورد انجام تحلیل تنش و عدم قطعیت روی هیدرولیک سامانه‌های آبرسانی، طراحان و بهره‌برداران را قادر می‌سازد که اشراف بیشتری به نقاط ضعف شبکه داشته و المان‌های ضعیف شبکه را شناسایی و در راستای مقاوم‌سازی شبکه به کاهش تنش ناشی از آنها، اجزای سامانه را به نحو مؤثرتری اصلاح یا مدیریت نمایند.

#### ۷- قدردانی

مقاله حاضر بخشی از نتایج طرح تحقیقاتی ملی به شماره ۹۲/۹/۱۷ مورخ ۳۳۴۲/ش/ق مورخ ۷۸۱۱-۱۲۲۰۳۴، شماره قرارداد ۳۳۴۲/ش/ق مورخ ۹۲/۹/۱۷ به سفارش و کارفرمایی شرکت آب و فاضلاب روستایی استان خوزستان بوده که به این وسیله نویسندگان از حمایت مالی مدیران و دست‌اندرکاران آن شرکت قدردانی می‌نمایند.

پارامترهای ورودی به شبکه شامل مصارف گرهی، زبری لوله‌ها و تراز سطح آب مخازن هوایی به‌صورت فاصله تغییرات در نظر گرفته شد و در ازای آن، تنش در فشارگره‌های مصرف، متناظراً به‌صورت بازه تغییرات به‌دست آمد. برای تعیین دو مقدار حدی از بازه تغییر هر یک از فشارهای گرهی، دو مسئله بهینه‌سازی تک هدفه شکل می‌گیرد که در آنها مصارف گره‌ها، زبری لوله‌ها و تراز آب در مخازن هوایی متغیرهای تصمیم‌گیری و حداقل و حداکثرسازی فشارگره مورد نظر، هدف بهینه‌سازی می‌باشند. بنابراین چنانچه شبکه دارای N گره مصرف باشد و از یک موتور بهینه‌سازی تک هدفه برای حل استفاده شود، اجرای متوالی تعداد 2N بهینه‌سازی‌های تک هدفه لازم خواهد بود که یک روند طولانی بوده و در طی آن از ارزیابی‌های متعدد مدل شبیه‌سازی استفاده مؤثری به عمل نمی‌آید. از این نظر در پژوهش حاضر از الگوریتم چند هدفه MOPSO که بهینه‌سازی 2N هدف مسئله فوق را همزمان در یک اجرا انجام می‌دهد، استفاده شد.

الگوریتم مورد اشاره برای یک شبکه کوچک واقعی با ۱۲۸ گره مصرف و ۱۴۸ لوله به اجرا گذاشته شد. در سناریوی تحلیل شده، اعمال همزمان  $\pm 15\%$  درصد تنش در مصارف گرهی و زبری هیزن ویلیامز لوله‌ها و  $\pm 1$  متر در تراز آب مخازن هوایی سبب بروز تنش قابل توجهی در فشارهای گرهی شده به‌طوری که در ۱۲۵ گره از ۱۲۸ گره مصرف شبکه، معیار حداقل فشار طراحی می‌تواند نقض شود.

با توجه به این که رویکرد پیشنهادی از ابزار بهینه‌سازی در

#### References

- Bao, Y. & Mays, L. 1990. Model for water distribution system reliability. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116, 1119-1137.
- Bargiela, A. & Hainsworth, G. 1989. Pressure and flow uncertainty in water systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 115, 212-229.
- Branisavljevic, N. & Ivetic, M. 2006. Fuzzy approach in the uncertainty analysis of the water distribution network of Becej. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 23, 221-236.
- Duan, H., Tung, Y. & Ghidaoui, M. 2010. Probabilistic analysis of transient design for water supply systems. *Journal of Water Resources Management*, 136, 678-687.
- Gupta, R. & Bhawe, P. R. 2007. Fuzzy parameters in pipe network analysis. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 24, 33-54.



- Haghighi, A. 2015. Analysis of transient flow caused by fluctuating consumptions in pipe networks: A many-objective genetic algorithm approach. *Water Resources Management*, 29, 2233-2248.
- Haghighi, A. & Zahedi Asl, A. 2014. Uncertainty analysis of water supply networks using the fuzzy set theory and NSGA-II. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 32, 270-282.
- Haghighi, A. & Keramat, A. 2012. A fuzzy approach for considering uncertainty in transient analysis of pipe networks. *Journal of Hydroinformatics*, 14, 1024-1035.
- Kennedy, J. & Eberhart, R. C. 1995. Particle swarm optimization. *IEEE Int. Conf. on Neural Networks*, Piscataway, IEEE Service Center, NJ.
- Mays, L. W. & Tung, Y. K. 1992. *Hydrosystem engineering and management*, McGraw-Hill, USA.
- Rao, S. S. & Berke, L. 1997. Analysis of uncertain structural systems using interval analysis. *AIAA Journal*, 35, 727-735.
- Revelli, R. & Ridolfi, L. 2002. Fuzzy approach for analysis of pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 93-101.
- Rossman, L. A. 2000. *Epanet 2 users manual*, U.S. Environmental Protection Agency.
- Sabzkouhi, A. M. & Haghighi, A. 2016. Uncertainty analysis of pipe-network hydraulics using a many-objective particle swarm optimization. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142 (9), Article No. 04016030.
- Sadat-Maki, H. 2014. *Reliability assessment of water distribution networks under uncertain nodal demand and pipe roughness*. MSc Thesis, RMIT University, Australia.
- Seifollahi-Aghmiuni, S., Bozorg Haddad, O. & Mariño, M. A. 2013. Water distribution network risk analysis under simultaneous consumption and roughness uncertainties. *Water Resources Management*, 27, 2595-2610.
- Sivakumar, P., Prasad, R. K. & Chandramouli, S. 2016. Uncertainty analysis of looped water distribution networks using linked EPANET-GA Method. *Water Resources Management*, 30, 331-358.
- Sivakumar, P., Prasad, R. K., Chandramouli, S. & Majumder, S. 2014. Uncertainty analysis of water distribution networks using linked EPANET-Vertex method. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 12, 17900-17911.
- Todini, E. & Pilati, S. 1987. A gradient method for the analysis of pipe networks. *International Conference on Computer Application for Water Supply and Distribution*, Leicester Polytechnic, UK.
- Tung, Y. K. & Yen, B. C. 2005. *Hydrosystems engineering uncertainty analysis*, USA, McGraw-Hill.
- Zadeh, L. 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338-353.

