

بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های توزیع آب شهری تحت شرایط کمبود به روش تأمین نوبتی

محمد سلگی^۱، امید بزرگ حداد^۲، پریسا قاسمی ایبازنی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

(نویسنده مسئول) Solgi_mohammad@ut.ac.ir

۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

(دریافت ۹۳/۹/۲۱ پذیرش ۹۴/۱۱/۲۴)

چکیده

در شرایط کمبود، مدیریت مصرف در شبکه‌های توزیع آب شهری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از راهکارهای مدیریتی، بهره‌برداری به روش تأمین نوبتی آب در شبکه توزیع است. بهره‌برداری به این روش، این امکان را فراهم می‌آورد تا با قطع آب برخی از مصرف‌کنندگان در بعضی از زمان‌ها، بتوان در زمان‌های وصل آب، نیاز گره‌های مصرفی را تحت فشار مطلوب تأمین نمود. یکی از مواردی که در تأمین آب به صورت نوبتی حائز اهمیت است، رعایت یکنواختی توزیع آب بین مصرف‌کنندگان است. در تحقیق حاضر یکنواختی توزیع آب و تأمین یک مقدار حداقل از آب، برای همه مصرف‌کنندگان به ترتیب با عنوان عدالت و انصاف، تعریف شده‌اند. در این تحقیق یک مدل بهینه‌سازی برای یافتن برنامه زمانی بهینه تأمین نوبتی با هدف بیش‌سازی تعداد تأمین‌ها، و همزمان تأمین قیودات مربوط به بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب توسعه داده شد. برای نشان دادن کارایی مدل ارائه شده، عملکرد آن برای شرایط کمبود آب متفاوت، توسط چندین سناریو در یک شبکه توزیع نمونه دو حلقه‌ای، مورد بررسی قرار گرفت. برای حل مدل بهینه‌سازی از ایجاد ارتباط بین الگوریتم بهینه‌سازی HBMO و شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET استفاده شد. نتایج به دست آمده حاکی از کارآمدی مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده به منظور یافتن برنامه زمانی بهینه تأمین نوبتی است. به طوری که حتی در شرایط تنش آبی بسیار شدید نیز مدل ارائه شده، آب موجود را به صورت ۱۰۰ درصد عادلانه همراه با رعایت انصاف، بین مصرف‌کنندگان توزیع نمود.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع آب شهری، کمبود آب، تأمین نوبتی، بهره‌برداری بهینه

۱- مقدمه

(WHO 2000; Vairavamoorthy 2008 & 2010; Choe & Varley 1997; Lund & Reed 1995)

در سال ۲۰۰۳ روشی برای طراحی شبکه‌های تأمین آب نوبتی ارائه شده است (Batish 2003). در تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۳ به ویژگی‌های مدل‌سازی شبکه‌های تأمین نوبتی پرداخته شده است (Sushikumar et al. 2003). تحقیق دیگری در سال ۲۰۰۴ به مسائل و مشکلات همراه با تأمین نوبتی پرداخته شد و مشکلات مربوطه طبقه‌بندی شده است (Totsuka et al. 2004). در سال ۲۰۰۶ مدلی برای شناسایی برنامه‌های بهینه تأمین نوبتی به منظور کاهش اثرات در شرایطی که شبکه آب از حوادث فیزیکی عمدی آسیب دیده باشد، توسعه داده شده است (Jeong & Abraham 2006). برخی از محققان، تحقیقاتی را در راستای پیش‌بینی مصرف آب در مناطق مسکونی انجام داده‌اند (Tabesh & Dini 2009)

شبکه‌های توزیع آب شهری از جمله اساسی‌ترین زیرساخت‌های هر شهر می‌باشند که مدل‌سازی، طراحی، بازسازی و بهره‌برداری از آنها همواره مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است (Seifollahi-Aghmiui et al. 2011 & 2013; Nazif et al. 2010; Tabesh et al. 2014, Tabesh & Saber 2012) یکی از چالش‌های موجود در بهره‌برداری از سامانه‌های تأمین آب شهری مواجه شدن با شرایطی است که در آن شبکه قادر به تأمین کل تقاضاهای موجود نیست و مدیریت نیاز در شبکه، امری اجتناب‌ناپذیر است. از جمله روش‌های مدیریت نیاز در شبکه، تأمین نوبتی است.

در بسیاری از مناطق جهان از جمله جنوب و جنوب شرقی آسیا و آمریکای لاتین، آب به صورت سهمیه‌بندی توزیع می‌شود

۲- تعریف عدالت و انصاف

این تحقیق بین مفهوم دو واژه عدالت و انصاف تمایز قائل شده است. به طوری که عدالت را شرایطی می‌داند که در یک دوره تأمین نوبتی نسبت کل تأمین به کل نیاز در گره‌های مختلف با یکدیگر برابر باشند و انصاف به شرایطی اشاره دارد که در یک دوره تأمین نوبتی، نسبت کل تأمین به کل نیاز در هر گره از حد مشخصی کمتر نباشد. به این ترتیب روابط زیر ارائه می‌شود

$$\frac{TS_i}{TDe_i} = \frac{TS_{i'}}{TDe_{i'}} \quad \forall i=1,2,\dots,N_i, \quad \forall i'=1,2,\dots,N_i \quad (1)$$

$$\frac{TS_i}{TDe_i} \geq L(R) \quad \forall i=1,2,\dots,N_i \quad (2)$$

$$L(R) = \theta \times R \quad (3)$$

$$R = \frac{TA}{TD} \quad (4)$$

که در آنها

N_i تعداد گره‌های مصرفی شبکه توزیع، TS_i و $TS_{i'}$ کل تأمین به ترتیب در گره‌های i و i' در دوره تأمین نوبتی، TDe_i و $TDe_{i'}$ کل نیاز به ترتیب در گره i و i' در دوره تأمین نوبتی، θ آستانه انصاف و می‌تواند عددی بین صفر تا یک باشد، TA کل دسترسی به آب در دوره تأمین نوبتی در شبکه و TD کل نیاز به آب در دوره تأمین نوبتی در شبکه می‌باشند.

۳- مدل بهینه‌سازی توسعه یافته

در این تحقیق، فرض شده است که همه گره‌های مصرفی شبکه مجهز به شیر قطع و وصل جریان می‌باشند. در ادامه مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده در این تحقیق تشریح شده است. تابع هدف مدل بهینه‌سازی توسعه یافته عبارت است از

$$O.F. = \text{MAX} \left(K1 \frac{\sum_{h=1}^{N_h} \sum_{i=1}^{N_i} \alpha_{i,h}}{N_h \times N_i} - K2 \times CV_{R_i} \right) \quad (5)$$

$$CV_{R_i} = \frac{\sigma R_i}{\mu R_i} \quad \forall i=1,2,\dots,N_i \quad (6)$$

$$R_i = \sum_{h=1}^{N_h} \alpha_{i,h} \quad \forall i=1,2,\dots,N_i, \quad \forall h=1,2,\dots,N_h \quad (7)$$

(Nasseri et al. 2011) در همین راستا، در سال ۲۰۰۹ در چهار شهر هند اثر تأمین پیوسته و تأمین نوبتی بر مصرف آب مسکونی مطالعه شده است (Andey & Kelkar 2009). در سال ۲۰۱۳ یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای بهبود انصاف و کمینه کردن هزینه در شبکه‌های توزیع نوبتی تحت وضعیت‌های کمبود، توسعه داده شده است (Ameyaw et al. 2013). متغیر تصمیم مدل بهینه‌سازی محل و گنجایش تانک‌ها و مخازن بوده است.

الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورهای عسل^۱ اولین بار توسط Bozorg Haddad et al. در سال ۲۰۰۶ توسعه داده شد (Bozorg Haddad et al. 2006). بسیاری از محققان توانایی الگوریتم HBMO را در حل مسائل مختلف مانند بهره‌برداری از مخازن آب، شبکه‌های توزیع و دیگر زمینه‌های علمی نشان داده‌اند (Afshar et al. 2007; Bozorg Haddad et al. 2008, 2010; Jahanshahi & Bozorg Haddad 2008; Ghajarnia et al. 2009; Soltanjalili et al. 2013; Mohan et al. 2010; Niknam 2009; Marinakis et al. 2008; Naik et al. 2015)

برخی از تحقیقات برتری الگوریتم HBMO را بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر مانند GA نشان دادند (Karimi et al. 2013). در الگوریتم HBMO ابتدا تعدادی جواب به صورت تصادفی تولید و بهترین آن‌ها به عنوان ملکه شناخته می‌شود. سپس ملکه به صورت تصادفی جواب‌هایی را به عنوان زنبور نر از فضای تصمیم و براساس تابع نورد انتخاب می‌کند. جواب‌های جدید به عنوان بچه زنبور با استفاده از توابع ترویج، جهش و توابع کاوشی دیگر تولید می‌شوند. مجدداً از میان جمعیت حاضر بهترین جواب به عنوان ملکه شناخته شده و مابقی جواب‌ها از بین می‌روند. فرایند مذکور یک روند تکراری است و تا زمانی که شرط توقف برقرار شود، ادامه می‌یابد (Bozorg Haddad et al. 2006).

هدف از انجام تحقیق حاضر، توسعه یک مدل بهینه‌سازی به منظور یافتن برنامه زمانی بهینه تأمین نوبتی است، به نحوی که این برنامه زمانی قادر باشد تا بیشترین تعداد تأمین ممکن را تحت فشار مطلوب، همراه با رعایت اصول عدالت و انصاف در بین گره‌های مختلف شبکه انجام دهد. سپس مدل توسعه داده شده در یک شبکه توزیع نمونه با استفاده از الگوریتم HBMO حل شده و نتایج حاصل از آن با روش‌های پیشین مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

¹ Honey-bee Mating Optimization Algorithm (HBMO)

مصرف در بازه‌های زمانی هیدرولیکی مختلف به‌عنوان ورودی به مدل داده شده است. در نهایت برای شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه و محاسبه فشار در هر بازه زمانی هیدرولیک $EPat_{i,h}$ به‌عنوان ضریب نوسان مصرف به شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET وارد می‌شود.

مقدار تابع هدف از دو عبارت تشکیل شده است: عبارت اول از سمت چپ که با علامت مثبت به تابع هدف افزوده شده است، مربوط به هدف اول (بیشینه کردن تعداد تأمین‌ها) است و همواره دارای مقداری بین صفر و یک است. عبارت دوم از سمت چپ که با علامت منفی از مقدار تابع هدف کم می‌شود، مربوط به هدف دوم (کمینه کردن ضریب تغییرات تعداد کل تأمین‌ها در گره‌های مختلف) است. بهترین مقدار تابع هدف هنگامی حاصل می‌شود که تأمین آب در تمام گره‌ها و در تمام بازه‌های زمانی با فشار مطلوب صورت گیرد و هیچ کمبود آبی در شبکه وجود نداشته باشد. در این شرایط مقدار عبارت اول مساوی با یک و عبارت دوم نیز مساوی با صفر خواهد بود و در صورتی که ضرایب $K1$ و $K2$ مساوی با یک انتخاب شده باشند، مقدار تابع هدف نیز مساوی با یک خواهد بود.

به‌طور خلاصه با استفاده از این تابع هدف، جواب‌هایی که بیشترین تعداد تأمین را در شبکه ایجاد کنند و از عدالت زمانی بهتری در تأمین آب بین گره‌های مختلف برخوردار باشند، برتری خواهند یافت. اما در شبکه‌هایی که در طول ساعات روز یا در بین گره‌های مختلف مقدار نیاز متفاوت است، توجه کردن به عدالت و انصاف زمانی برای رفاه و رضایت‌مندی مصرف‌کنندگان به تنهایی کافی نیست. بنابراین قیدی در ادامه به مدل اضافه شده که هم‌زمان با تابع هدف بتواند عملکرد مناسبی را ایجاد نماید. به‌طوری که این قید بر رعایت انصاف حجمی در شبکه تمرکز دارد

$$\frac{SQ_i}{SDe_i} \geq VL(RW) \quad \forall i = 1, 2, \dots, Ni \quad (12)$$

$$VL(RW) = \theta \times RW \quad (13)$$

$$RW = \frac{TVA}{TVD} \quad (14)$$

$$(15)$$

$$\begin{cases} SQ_i = \sum_1^{Nh} Q_{i,h} \\ SDe_i = \sum_1^{Nh} De_{i,h} \end{cases} \quad \forall i = 1, 2, \dots, Ni \quad , \quad \forall h = 1, 2, \dots, Nh$$

$$\alpha_{i,h} = \delta_{i,m} \quad (m-1) \times Li \leq \forall h < m \times Li \quad (8)$$

$$Li = C \times Ls \quad (9)$$

$$\delta_{i,m} = \{0,1\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, Ni \quad , \quad \forall m = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

$$(11)$$

$$EPat_{i,h} = \alpha_{i,h} \times Pat_{i,h} \quad \forall i = 1, 2, \dots, Ni \quad , \quad \forall h = 1, 2, \dots, Nh$$

که در آنها

Nh تعداد گام‌های زمانی هیدرولیکی در یک دوره تأمین نوبتی $\alpha_{i,h}$ شاخص مربوط به تأمین نیاز در گره i و گام زمانی هیدرولیکی $R_{i,h}$ حاصل جمع شاخص نیاز برای گره i در تمام گام‌های زمانی هیدرولیکی $CV_{R_{i,h}}$ ضریب تغییرات R_i ، σ_{R_i} انحراف معیار R_i ، μ_{R_i} میانگین R_i ، $K1$ و $K2$ ضریبی از مجموعه اعداد حقیقی و مثبت که به‌عنوان وزنی برای اهداف مختلف تعریف شده، در تابع هدف استفاده می‌شوند که به‌وسیله آنها می‌توان اهمیت اهداف مختلف را در محاسبه مقدار تابع هدف تغییر داد، M تعداد بازه‌های زمانی تأمین نوبتی در یک دوره تأمین نوبتی، Ls طول گام زمانی هیدرولیکی، Li طول بازه زمانی تأمین نوبتی، C ضریبی از مجموعه اعداد طبیعی است که مشخص‌کننده نسبت طول بازه زمانی تأمین نوبتی به طول گام زمانی هیدرولیکی است که طول بازه زمانی تأمین نوبتی باید بزرگ‌تر یا مساوی با مضرب صحیحی از طول گام زمانی هیدرولیکی باشد، $\delta_{i,m}$ متغیر تصمیم‌مدل بهینه‌سازی است که می‌تواند یکی از مقادیر صفر یا یک را اختیار نماید به‌طوری که مقدار یک به معنای تأمین آب در گره i در بازه زمانی تأمین نوبتی m است و مقدار صفر به معنای عدم تأمین آب در گره i در بازه زمانی تأمین نوبتی m است. $EPat_{i,h}$ ضریب الگوی زمانی اصلاح شده برای گره i در گام زمانی هیدرولیکی h می‌باشد، به‌طوری که از این الگوی زمانی مصرف اصلاح شده جهت انجام محاسبات هیدرولیکی استفاده می‌شود. اگر در بازه زمانی هیدرولیکی h نیاز تأمین نشود به واسطه $\alpha_{i,h}$ که صفر است، $EPat_{i,h}$ نیز صفر خواهد بود و اگر $\alpha_{i,h}$ برابر با یک باشد به این معنی که تأمین در بازه زمانی هیدرولیکی h انجام می‌شود و مقدار $EPat_{i,h}$ برابر خواهد بود با $Pat_{i,h}$ که به‌عنوان ضریب نوسان

که در آن ورودی به مخزن زدر گام زمانی هیدرولیکی h و O_h^j حجم آب خروجی از مخزن z در گام زمانی هیدرولیکی h است و S_{Final}^j حجم آب موجود در مخزن ذخیره z در انتهای دوره تأمین نوبتی است. S_i^j (حجم اولیه مخزن زدر شروع دوره تأمین نوبتی) در این تحقیق مقداری معلوم در نظر گرفته شد.

در شرایطی که این احتمال وجود دارد که پس از یک دوره تأمین نوبتی هم‌چنان کمبود آب ادامه یابد، با برقراری رابطه ۱۹، می‌توان از همان برنامه زمانی قبلی به‌عنوان یک قاعده بهره‌برداری، مجدداً استفاده نمود.

با توجه به این که در تمام طول دوره تأمین نوبتی، مانند وضعیت پیوسته لوله‌های شبکه پر از آب و تحت فشار هستند، این امکان وجود دارد تا برای شبیه‌سازی هیدرولیکی از نرم‌افزار EPANET و آنالیزهای متکی به نیاز استفاده شود و اگر در نتیجه یک برنامه زمانی قطع و وصل، فشار آب در گره‌ای از شبکه، کمتر از فشار کمینه مجاز (P_{min_i}) شود، رابطه ۱۶ به‌عنوان قید مدل بهینه‌سازی عملاً آن جواب را یک جواب ناموجه می‌شناسد.

۴- معیارهای کارایی

در این تحقیق برای بررسی کمی نتایج حاصل از مدل توسعه داده شده از دو معیار کارایی اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری استفاده شد.

۴-۱- اعتمادپذیری

اعتمادپذیری زمانی، احتمال عدم وقوع شکست در یک دوره بهره‌برداری تعریف شده است (Hushimoto et al. 1982). همچنین اعتمادپذیری کمی، درصد تأمین نیاز تعریف شده است (Duckstein & Plate 1988). در این تحقیق هر دو اعتمادپذیری زمانی و کمی به دو روش متفاوت محاسبه شدند. روش اول تأمین نیاز را در کل شبکه در نظر گرفته اما روش دوم تأمین نیاز را در گره‌های مصرفی شبکه در نظر گرفته است

$$\omega_{\beta} = \frac{100}{N_h} \times \sum_{h=1}^{N_h} \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{i=1}^{N_i} Q_{i,h} \geq \beta \times \sum_{i=1}^{N_i} De_{i,h} \\ 0 & \text{if otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, N_i, \quad \forall h = 1, 2, \dots, N_h$$

که در آن RW نسبت کل حجم آب در دسترس در طول دوره تأمین نوبتی به کل نیاز حجمی شبکه در طول دوره تأمین نوبتی، $VL(RW)$ کم‌ترین نسبت حجمی تأمین منصفانه در هر گره متناسب با RW ، مقدار $Q_{i,h}$ مقدار تأمین حجمی آب در گره i و در گام زمانی هیدرولیکی $De_{i,h}$ مقدار نیاز در گره i و گام زمانی هیدرولیکی h ، TVD کل نیاز حجمی شبکه در طول دوره تأمین نوبتی، TVA کل حجم آب در دسترس در طول دوره تأمین نوبتی می‌باشند. اگر مقدار θ برابر با یک انتخاب شود حضور این قید در مدل بهینه‌سازی سبب خواهد شد تا مدل به سمت یافتن جواب‌هایی برود که در آن‌ها درصد کمبود آب تأمین شده در هر گره در طول دوره تأمین نوبتی هرگز بیشتر از درصد کمبود آب در شبکه نباشد.

بنابراین قیدی به قرار زیر به مدل اضافه شده تا از ایجاد فشارهای کم و فشارهای بسیار زیاد در شبکه جلوگیری شود

(۱۶)

$$P_{min_i} \leq P_{i,h} \leq P_{max_i} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_i, \quad \forall h = 1, 2, \dots, N_h$$

که در آن

$P_{i,h}$ فشار در گره i و گام زمانی هیدرولیکی h ، P_{min_i} کمترین فشار مجاز در هر گره i و P_{max_i} بیشترین فشار مجاز در شبکه می‌باشد. روابط زیر بیانگر قیودات مربوط به حجم مخازن در طول دوره کمبود می‌باشند

$$0 \leq S_h^j \leq S_{max}^j \quad \forall j = 1, 2, \dots, N, \quad \forall h = 1, 2, \dots, N_h \quad (17)$$

(۱۸)

$$S_{h+1}^j = S_h^j + I_h^j - O_h^j \quad \forall j = 1, 2, \dots, N, \quad \forall h = 1, 2, \dots, N_h$$

$$S_{Final}^j \geq S_i^j \quad \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (19)$$

که در آن‌ها

N تعداد مخازن ذخیره موجود در شبکه، S_h^j حجم آب ذخیره شده در مخزن z در ابتدای گام زمانی هیدرولیکی h و S_{max}^j ظرفیت مخزن ذخیره z که به‌عنوان ورودی به مدل وارد می‌شود I_h^j حجم آب

که در آنها γ_β برگشت پذیری شبکه و γ'_β برگشت پذیری گره‌ای است.

۵- مورد مطالعاتی

برای آزمایش عملکرد مدل توسعه داده شده در این تحقیق از یک شبکه دو حلقه‌ای نمونه که در سال ۱۹۷۷ معرفی شده است، استفاده شد (Alperovits & Shamir 1977). در سناریوهای متفاوت در نظر گرفته شده، نتایج حاصل از مدل توسعه داده شده با نتایج حاصل از روش تأمین با اولویت ثابت مقایسه می‌شوند (Soltanjalili et al. 2013). الگوی زمانی مصرف در شبکه مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. خصوصیات گره‌های مصرفی و لوله‌های این شبکه در جدول ۱ بیان شده‌اند و نمایی از شبکه در شکل ۲ نشان داده شده است. طول تمام لوله‌ها برابر با ۱۰۰۰ متر و ضریب هیزن- ویلیامز نیز برای همه لوله‌ها برابر با ۱۳۰ فرض شده است. کمینه فشار مورد نیاز ($P_{min,i}$) و بیشینه فشار مجاز ($P_{max,i}$) در همه گره‌های مصرفی به ترتیب برابر با ۳۰ و ۱۰۰ متر آب و رقم مخزن ذخیره برابر با ۲۵۰ متر در نظر گرفته شد. برای شبکه

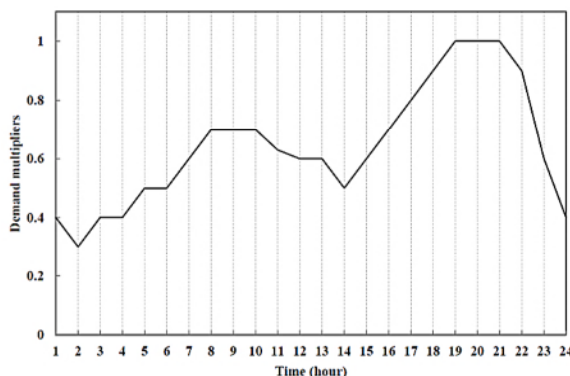


Fig. 1. Temporal consumption pattern

شکل ۱- الگوی زمانی مصرف

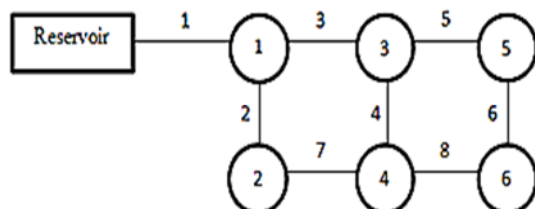


Fig. 2. Double-loop distribution network plan

شکل ۲- پلان شبکه توزیع دو حلقه‌ای

$$\omega'_\beta = 100 \times \prod_i \left(\frac{\sum_{h=1}^{N_h} \begin{cases} 1 & \text{if } Q_{i,h} \geq \beta \times De_{i,h} \\ 0 & \text{if otherwise} \end{cases}}{N_h} \right) \quad (21)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, N_i, \quad \forall h = 1, 2, \dots, N_h$$

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} S Q_i}{\sum_{i=1}^{N_i} S D e_i} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_i \quad (22)$$

$$\varphi'_\beta = \prod_i \frac{S Q_i}{\beta \times S D e_i} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N_i \quad (23)$$

که در آنها

ω_β مقدار اعتماد پذیری زمانی شبکه، ω'_β مقدار اعتماد پذیری زمانی گره‌ای، φ مقدار اعتماد پذیری کمی شبکه، φ'_β مقدار اعتماد پذیری کمی گره‌ای و β آستانه کارایی (کارایی سامانه بالاتر از این آستانه پیروزی و کمتر از آن شکست تعریف می‌شود) می‌باشند که هر یک می‌تواند مقدار بین صفر تا ۱۰۰ درصد داشته باشند.

۴-۲- برگشت پذیری

برگشت پذیری احتمال بازگشت یک سامانه از وضعیت شکست به وضعیت عادی تعریف شده است و مقدار آن برابر است با نسبت تعداد دوره‌های شکست به تعداد بازه‌های شکست در طول دوره بهره‌برداری (Hashimoto et al. 1982). کوچک بودن احتمال بازگشت یک سامانه از وضعیت شکست به وضعیت عادی نشان دهنده عدم قابلیت برنامه‌ریزی انجام شده جهت بهره‌برداری از سامانه مورد نظر است.

$$(24)$$

$$\gamma_\beta = 100 \times \frac{\sum_{h=1}^{N_h} \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{i=1}^{N_i} Q_{i,h} < \sum_{i=1}^{N_i} \beta \times De_{i,h}, \sum_{i=1}^{N_i} Q_{i,h-1} \geq \sum_{i=1}^{N_i} \beta \times De_{i,h-1} \\ 0 & \text{if otherwise} \end{cases}}{\sum_{h=1}^{N_h} \begin{cases} 1 & \text{if } \sum_{i=1}^{N_i} Q_{i,h} < \sum_{i=1}^{N_i} \beta \times De_{i,h} \\ 0 & \text{if otherwise} \end{cases}}$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, N_i, \quad \forall h, \forall h' = 1, 2, \dots, N_h$$

$$\gamma'_\beta = 100 \times \prod_i \frac{\sum_{h=1}^{N_h} \begin{cases} 1 & \text{if } Q_{i,h} < \beta \times De_{i,h}, Q_{i,h-1} \geq \beta \times De_{i,h-1} \\ 0 & \text{if otherwise} \end{cases}}{\sum_{h=1}^{N_h} \begin{cases} 1 & \text{if } Q_{i,h} < \beta \times De_{i,h} \\ 0 & \text{if otherwise} \end{cases}} \quad (25)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, N_i, \quad \forall h, \forall h' = 1, 2, \dots, N_h$$

مخزن در طول دوره تأمین نوبتی به صورت ساعتی بوده و این مقدار برابر است با کل آب در دسترس در یک روز تقسیم بر ۲۴ ساعت. برای تمام سناریوها مقدار θ مساوی با ۰/۹ و ضرایب K1 و K2 مساوی با یک در نظر گرفته شدند و مدل بهینه‌سازی برای این سناریوها از طریق ایجاد ارتباط بین شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET و الگوریتم بهینه‌سازی HBMO حل شد. تعداد متغیرهای تصمیم به‌کار رفته در مدل بهینه‌سازی برابر با حاصلضرب تعداد بازه‌های زمانی تأمین نوبتی در تعداد گره‌های مصرفی شبکه یعنی $144 = 24 \times 6$ عدد می‌باشد. در هر بار اجرای مدل تعداد پروازهای جفت‌گیری (تکرار) مساوی با ۲۰۰ و تعداد زنبورها برابر با ۱۱۰ عدد می‌باشند. برای مقایسه مدل توسعه داده شده با روش تأمین با اولویت ثابت، مقدار تابع هدف و معیارهای کارایی برای جواب‌های حاصل از روش توسعه داده شده در این تحقیق و روش تأمین با اولویت ثابت که از سناریوهای ۲ تا ۱۰ به دست آمدند، در جدول‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. همچنین، اطلاعات مذکور برای جواب به دست آمده از مدل توسعه داده شده که مربوط به سناریوهای ۱۱، ۱۲ و ۱۳ می‌باشند نیز به ترتیب در جدول‌های ۳، ۴ و ۵ آورده شده‌اند.

در جدول‌های ۳، ۴ و ۵، UCOF مقدار تابع هدف نامقید است به این معنی که تخطی از قیود مدل بهینه‌سازی سبب کسر هیچ مقداری به عنوان جریمه از مقدار تابع هدف نمی‌شود. همچنین منظور از روش ۱، روش توسعه داده شده در این تحقیق و منظور از روش ۲، روش تأمین با اولویت ثابت می‌باشد. در این جدول‌ها مقادیر بزرگ‌تر (بهتر) تابع هدف و معیارهای کارایی همچنین مقادیر کوچک‌تر (بهتر) CV_{Ri} برای هر سناریو از میان دو روش مورد مقایسه با علامت زیر خط مشخص شده‌اند.

در تنش‌های آبی کم، متوسط و شدید که نتایج سناریوهای مربوط به آنها به ترتیب در جدول‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند، مشاهده می‌شود که مقادیر نامقید تابع هدف برای روش ۱ همواره بزرگ‌تر از روش ۲ است. برای تمام سناریوها دیده می‌شود که مقدار CV_{Ri} برای روش ۱ مساوی با صفر است. در حالی که برای روش ۲ در تنش‌های آبی کم، متوسط و شدید این مقدار تقریباً و به ترتیب مساوی با ۰.۲۵، ۰.۵۰ و ۰.۸۰ درصد است و این به معنای ناعدالتی در تأمین نیاز بین گره‌های مختلف شبکه توسط روش ۲ است. همین مسئله سبب شده است تا مقدار تابع هدف در روش ۲

جدول ۱- خصوصیات گره‌ها و لوله‌های شبکه توزیع دو حلقه‌ای

Table 1. Characteristics of the nodes and pipes in the double-loop distribution network

Consumption node/Pipe	Pipe diameter (mm)	Node elevation (m)	Base demand (m^3/h)
1	457.2	150	100
2	254.0	160	100
3	406.4	155	120
4	101.6	150	270
5	406.4	165	330
6	254.0	160	200
7	254.0	-	-
8	254.0	-	-

توزیع دو حلقه‌ای ۱۳ سناریو متفاوت تعریف شدند. اطلاعات مربوط به سناریوها در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. در جدول ۲، ISV حجم آب موجود در مخزن ذخیره در شروع دوره تأمین نوبتی، ST ساعت شروع دوره تأمین نوبتی و I حجم آب ورودی به مخزن در هر ساعت است.

جدول ۲- اطلاعات مربوط به سناریوهای تعریف شده

Table 2. Data of the scenarios formulated

Scenario	ISV (m^3)	I (m^3/h)	WA (m^3)	RW (%)	ST (hour)
1	2000	720	17,282	100	1
2	•	504	12,098	70	1
3	•	504	12,098	70	14
4	•	504	12,098	70	19
5	•	360	8,641	50	1
6	•	360	8,641	50	14
7	•	360	8,641	50	19
8	•	216	5,185	30	1
9	•	216	5,185	30	14
10	•	216	5,185	30	19
11	2000	504	12,098	70	1
12	2000	360	8,641	50	1
13	2000	216	5,185	30	1

در همه سناریوها، گنجایش مخزن ذخیره برابر با ۵۰۰۰ مترمکعب و طول دوره تأمین نوبتی یک روز یعنی ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. برای تمام سناریوها، بازه‌های زمانی تأمین نوبتی نیز برابر با گام‌های زمانی هیدرولیکی و مساوی با یک ساعت در نظر گرفته شد. کل حجم آب ورودی به مخزن در هر روز متناسب با مقدار آب موجود با توجه به سناریو تعریف شده بود. با توجه به نیاز پایه هر گره و ضرایب الگوی مصرف در ۲۴ ساعت، کل نیاز حجمی شبکه (TVD) برابر با ۱۷۲۸۲ مترمکعب در روز است. ورود آب به

توسعه داده شده در رعایت عدالت در تأمین نیاز گره‌های مختلف شبکه در تنش‌های آبی متفاوت است. به‌طور کلی اعتمادپذیری زمانی شبکه در روش ۲ بیشتر (بهتر) از روش ۱ است. اما برای برگشت‌پذیری شبکه وضعیت برعکس است و در مجموع روش ۱

همواره کوچک‌تر از روش ۱ باشد. از طرف دیگر در روش ۲ با افزایش شدت کمبود، میزان ناعدالتی نیز افزایش یافته است. درحالی‌که در روش ۱ در تمام شرایط کمبود، همواره مقدار CV_R برابر صفر باقی مانده است که این به معنای توانایی مدل

جدول ۳- مقایسه معیارهای کارایی حاصل از مدل توسعه داده شده در این تحقیق و روش تأمین با اولویت ثابت

در شرایط تنش آبی کم (سناریوهای ۲، ۳، ۴ و ۱۱)

Table 3. Comparison of the efficiency criteria obtained from the model developed in this study and the supply method with fixed priorities under low water stress (scenarios 2, 3, 4, and 11)

Scenario	2		3		4		11
Method	1	2	1	2	1	2	1
UCOF	<u>0.708</u>	0.593	<u>0.750</u>	0.581	<u>0.708</u>	0.603	0.708
$CV_{Ri} \times 100$	<u>0.0</u>	26.1	<u>0.0</u>	27.3	<u>0.0</u>	25.2	0.0
ω_{100}	16.7	<u>41.7</u>	20.8	<u>37.5</u>	20.8	<u>41.7</u>	4.2
ω_{70}	54.2	<u>70.8</u>	62.5	<u>75.0</u>	66.7	<u>75.0</u>	62.5
ω_{60}	<u>75.0</u>	70.8	<u>79.2</u>	75.0	<u>83.3</u>	75.0	79.2
ω'_{100}	12.6	<u>29.5</u>	17.8	<u>28.1</u>	17.8	<u>29.9</u>	12.6
γ_{100}	<u>25.0</u>	14.3	<u>15.8</u>	13.3	<u>26.3</u>	21.4	8.7
γ_{70}	<u>45.5</u>	28.6	<u>44.4</u>	16.7	<u>62.5</u>	50.0	55.6
γ_{60}	<u>66.7</u>	28.6	<u>40.0</u>	16.7	50.0	50.0	100.0
γ'_{100}	<u>12.7</u>	4.1	<u>9.3</u>	2.2	6.9	<u>10.7</u>	19.3
ϕ'_{100}	11.3	<u>17.6</u>	12.5	<u>16.9</u>	12.3	<u>18.3</u>	10.6
ϕ'_{70}	<u>91.5</u>	36.0	<u>93.5</u>	34.5	<u>89.7</u>	40.0	83.0
ϕ'_{60}	<u>100.0</u>	49.0	<u>100.0</u>	44.3	<u>100.0</u>	50.8	100.0
ϕ	69.4	<u>69.5</u>	<u>69.7</u>	69.6	<u>69.9</u>	69.8	69.1

جدول ۴- مقایسه معیارهای کارایی حاصل از مدل توسعه داده شده در این تحقیق و روش تأمین با اولویت ثابت

در شرایط تنش آبی متوسط (سناریوهای ۵، ۶، ۷ و ۱۲)

Table 4. Comparison of the efficiency criteria obtained from the model developed in this study and the supply method with fixed priorities under low water stress (scenarios 5, 6, 7, and 12)

Scenario	5		6		7		12
Method	1	2	1	2	1	2	1
UCOF	<u>0.542</u>	0.221	<u>0.500</u>	0.214	<u>0.542</u>	0.214	0.542
$CV_{Ri} \times 100$	<u>0.0</u>	49.5	<u>0.0</u>	50.2	<u>0.0</u>	50.2	0.0
ω_{100}	4.2	<u>12.5</u>	8.3	8.3	0.0	<u>8.3</u>	12.5
ω_{70}	<u>58.3</u>	33.3	<u>45.8</u>	37.5	<u>58.3</u>	37.5	54.2
ω_{60}	70.8	<u>83.3</u>	79.2	<u>83.3</u>	<u>66.7</u>	83.3	70.8
ω'_{100}	2.5	<u>3.5</u>	2.5	<u>2.6</u>	2.5	<u>2.6</u>	2.5
γ_{100}	8.7	<u>14.3</u>	<u>13.6</u>	9.1	4.2	<u>9.1</u>	14.3
γ_{70}	<u>50.0</u>	25.0	<u>38.5</u>	13.3	<u>50.0</u>	26.7	27.3
γ_{60}	<u>57.1</u>	50.0	<u>80.0</u>	50.0	50.0	50.0	85.7
γ'_{100}	1.0	<u>1.8</u>	<u>2.9</u>	0.6	<u>6.7</u>	1.2	2.7
ϕ'_{100}	<u>1.6</u>	1.2	<u>1.6</u>	0.9	<u>1.6</u>	0.9	1.5
ϕ'_{70}	<u>87.8</u>	6.5	<u>87.2</u>	4.8	<u>92.7</u>	4.7	85.7
ϕ'_{60}	<u>100.0</u>	10.1	<u>100.0</u>	7.5	<u>100.0</u>	7.4	100.0
ϕ	<u>50.0</u>	49.6	49.7	<u>49.8</u>	<u>50.0</u>	49.5	49.0

جدول ۵- مقایسه معیارهای کارآیی حاصل از مدل توسعه داده شده در این تحقیق و روش تأمین با اولویت ثابت در شرایط تنش آبی متوسط (سناریوهای ۸، ۹، ۱۰ و ۱۳)

Table 5. Comparison of the efficiency criteria obtained from the model developed in this study and the supply method with fixed priorities under low water stress (scenarios 8, 9, 10, and 13)

Scenario	8		9		10		13
	1	2	1	2	1	2	1
UCOF	0.292	-0.305	0.333	-0.287	0.333	-0.272	0.333
CV _{Ri} ×100	0.0	82.6	0.0	81.5	0.0	79.9	0.0
ω_{100}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ω_{70}	45.8	33.3	54.2	29.2	50.0	33.3	37.5
ω_{60}	62.5	79.2	70.8	83.3	70.8	79.2	58.3
ω'_{100}	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
γ_{100}	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
γ_{70}	38.5	18.8	54.5	17.6	41.7	18.8	53.3
γ_{60}	55.6	60.0	71.4	25.0	57.1	40.0	60.0
γ'_{100}	0.2	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.4
ϕ'_{100}	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
ϕ'_{70}	83.4	0.0	86.3	0.0	85.5	0.0	85.8
ϕ'_{60}	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0
ϕ	29.4	29.6	29.9	29.8	30.0	30.0	30.0

جدول ۶- مقدار متغیرهای تصمیم مربوط به بهترین جواب حاصل از مدل بهینه‌سازی برای سناریو ۲

Table 6. Values of the decision variables related to the best solution obtained from the optimization model applied to scenario 2

Node	Time (hour)																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0
2	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1
3	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1
4	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1
5	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1
6	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1

افزایش می‌یابد، اما هم‌زمان تعداد دوره‌های شکست نیز افزایش یافته و در عوض طول دوره‌های شکست کاهش می‌یابد. این مسئله باعث بهبود برگشت‌پذیری و کاهش اعتمادپذیری زمانی شبکه می‌شود. در شرایط تنش آبی شدید مطابق جدول ۵ مشاهده می‌شود که اعتمادپذیری زمانی گره‌ای در تمام سناریوها برای روش ۲ مساوی با صفر است که بیان‌گر این نکته است که در این روش حداقل یک گره وجود داشته که در طول دوره تأمین نوبتی هیچ آبی به آن تخصیص داده نشده است. برعکس در روش ۱ هرگز اعتمادپذیری زمانی گره‌ای صفر نشده است که به این معنی است که حتی در شرایط تنش آبی شدید نیز در طول دوره بهره‌برداری توسط روش ۱ به تمام گره‌ها آب تخصیص داده شده است. مشاهده می‌شود

برگشت‌پذیری بهتری نسبت به روش ۲ دارد. زیرا در روش ۲ که یک قاعده بهره‌برداری است، در ساعاتی که ورودی به شبکه بیشتر از نیاز است، نیازها تأمین می‌شوند و اگر ورودی به شبکه کمتر از نیازها باشد، نیازها تا حد امکان تأمین می‌شوند. با توجه به این که در شبکه مورد مطالعه در تمام ساعات حجم آب ورودی به شبکه ثابت ولی مقدار نیازها در ساعات مختلف متفاوت هستند، روش ۲ در تأمین نیاز ساعات‌های پرمصرف متوالی شکست خورده است. اما در روش ۱ که یک روش بهینه‌سازی است تأمین کمتر آب در ساعات‌های کم مصرف‌تر باعث می‌شود تا آب ذخیره شده در مخزن در ساعات‌های پرمصرف متوالی باعث تأمین نیاز در حداقل یکی از این ساعات‌ها شده و اگرچه در این روش تعداد بازه‌های شکست

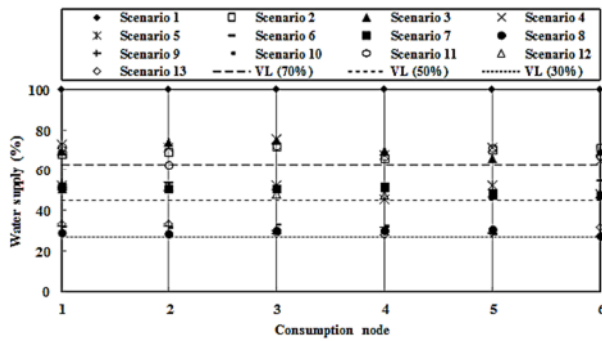


Fig. 3. Total supplied water to total water demand ratio during the intermittent supply period obtained from method 1 for all the nodes of the double-loop distribution network under scenarios 1 to 13 and the lowest ratio of supply to fair demand under different deficit situations

شکل ۳- نسبت کل حجم آب تأمین شده به کل حجم آب مورد نیاز در طول دوره تأمین نوبتی حاصل از روش ۱ برای تمام گره‌های شبکه توزیع دو حلقه‌ای در سناریوهای ۱ تا ۱۳ و کمترین نسبت تأمین به نیاز منصفانه در شرایط کمبود متفاوت

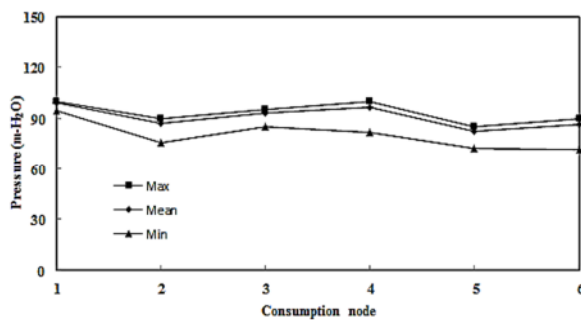


Fig. 4. Mass curve for the pressure at the nodes in the double-loop network obtained from method 1 under all the scenarios 1 to 13

شکل ۴- منحنی پوش مربوط به فشار گره‌های شبکه دو حلقه‌ای حاصل از روش ۱ مربوط به تمام سناریوهای ۱ تا ۱۳

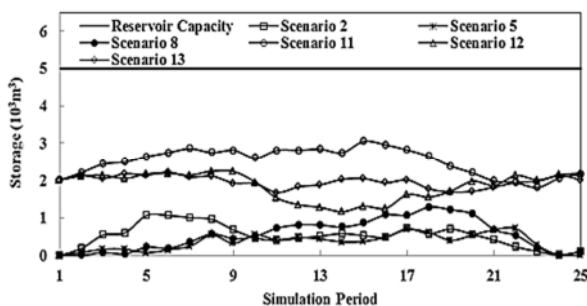


Fig. 5. Tank storage during the intermittent supply period

شکل ۵- حجم مخزن ذخیره در طول دوره تأمین نوبتی

که برای تمام سناریوها، اعتمادپذیری حجمی گره‌ای برای تمام آستانه‌های کارایی در روش ۱ بیشتر از روش ۲ است، به طوری که در سناریوهای ۸، ۷ و ۹ حتی تا ۱۰۰ درصد نیز افزایش داشته است و این نتیجه حضور قید مربوط به انصاف رابطه ۱۳ در مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده می‌باشد. در نهایت اعتمادپذیری حجمی شبکه در تمام تنش‌های آبی متفاوت و برای همه سناریوها تقریباً مساوی با RW است و اختلاف کمی که وجود دارد به علت صفر یا ۱۰۰ درصد بودن نسبت تأمین به نیاز است. از این برابری می‌توان نتیجه گرفت که در هر دو روش مقدار آب مصرف شده در طول دوره تأمین نوبتی مساوی با مقدار آب ورودی به شبکه در طول دوره تأمین نوبتی است که در ارتباط با روش ۱ همگرایی صحیح مدل بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. مقادیر متغیرهای تصمیم مربوط به بهترین جواب حاصل از مدل بهینه‌سازی برای سناریو ۲ در جدول ۶ نشان داده شده است. در جدول ۶ مقدار یک به معنای تأمین آب و مقدار صفر نشان دهنده عدم تأمین آب است.

یکی از قیدهایی که در مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده در نظر گرفته شده است، مربوط به رعایت انصاف است. بر مبنای این قید باید در هر گره مصرفی شبکه، نسبت کل تأمین به کل نیاز در طول دوره تأمین نوبتی بیشتر از یک کمیته تعیین شده (RW) VL باشد که توسط رابطه ۱۳ و با معلوم بودن مقدار θ که در این تحقیق مساوی با $0/9$ در نظر گرفته شده است، محاسبه می‌شود. شکل ۳ نشان دهنده نسبت کل تأمین به کل نیاز در تمام گره‌های شبکه برای سناریوهای ۱ تا ۱۳ است. همچنین در این شکل مقدار (RW) VL نیز برای تنش‌های آبی متفاوت نشان داده شده است.

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که در تمام سناریوها، قید مربوط به انصاف رعایت شده و در تمام گره‌ها حجم آب تأمین شده منصفانه بوده است.

در شکل ۴ منحنی پوش مربوط به فشار گره‌های مختلف در طول دوره تأمین نوبتی حاصل از تمام سناریوها نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در طول دوره تأمین نوبتی و برای همه شرایط کمبود، همواره فشارها در محدوده مناسبی قرار دارند. در شکل ۵ حجم مخزن ذخیره در طول دوره تأمین نوبتی نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که حجم مخزن همواره بزرگ‌تر از صفر بوده است و همچنین هرگز از ظرفیت مخزن تجاوز نکرده است.

حفظ می‌نماید. با شروع دوره تأمین نوبتی از ساعات مختلف شبانه‌روز مشاهده شد که عملکرد مدل بهینه‌سازی مستقل از ساعات شروع دوره تأمین نوبتی است. در نتایج حاصل از مقایسه مدل توسعه داده شده در این تحقیق و روش تأمین با اولویت ثابت مشاهده شد که برخلاف روش تأمین با اولویت ثابت که نیاز گره‌های مختلف شبکه را به صورت کاملاً ناعادلانه تأمین نموده و قادر به تأمین کمترین نسبت تعیین شده تأمین نیاز در تمام گره‌های شبکه نیست، روش حاضر علاوه بر یک تأمین عادلانه توانست کمترین نسبت تأمین به نیاز منصفانه را برای تمام گره‌های شبکه رعایت نماید. علاوه بر این مدل توسعه داده شده در این تحقیق توانست نسبت به روش تأمین با اولویت ثابت برگشت‌پذیری را تا ۵۱/۴ درصد بهبود ببخشد. از جمله مهم‌ترین مسائل در مسیر اجرایی شدن تحقیق حاضر جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز می‌باشد. با توجه به تجارب فراوان داخلی از به‌کارگیری روش تأمین نوبتی در شبکه‌های توزیع، جمع‌آوری داده‌های مربوط به انجام این روش و در دسترس قرار دادن آنها می‌تواند کمک شایانی به پژوهشگران در راستای پیش‌بینی نیازها، دیدن شرایط و محدودیت‌ها و اصلاح مدل توسعه داده شده در راستای به‌کارگیری آن در شرایط واقعی بنماید.

۷- قدردانی

تحقیق حاضر بخشی از پژوهش انجام شده تحت حمایت مالی معاون پژوهشی دانشگاه تهران به شماره ۷/۱/۸۷۹۶/۷۳۱۴ می‌شود. به این وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران قدردانی می‌شود.

در مجموع و با توجه به نتایج به‌دست آمده از سناریوهای متفاوت می‌توان بیان نمود که وجود یا عدم وجود حجم ذخیره اولیه و همچنین زمان شروع دوره تأمین نوبتی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد و نتایج حاصل از روش توسعه داده شده در این تحقیق ندارد و تنها تفاوت، اختلاف در نسبت تأمین نیاز در ساعات اوج مصرف شبکه است که در شرایطی که حجم اولیه‌ای در مخزن وجود داشته باشد یا دوره تأمین نوبتی از کم‌مصرف‌ترین زمان آغاز شود، این امکان فراهم می‌شود تا تأمین در ساعات اوج مصرف شبکه به مقدار بیشتری صورت گیرد که البته این تأمین بیشتر در ساعات اوج مصرف، نتیجه تأمین کمتر در زمان‌های کم‌مصرف‌تر است.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور یافتن برنامه زمانی بهینه جهت بهره‌برداری از شبکه توزیع در شرایط کمبود، یک مدل بهینه‌سازی توسعه داده شد. اهداف مدل بهینه‌سازی عبارت بودند از: ۱- بیشینه کردن تعداد تأمین‌ها و ۲- کمینه کردن ضریب تغییرات تعداد تأمین‌ها در بین گره‌های مختلف شبکه. دو هدف مذکور با استفاده از روش وزن‌دهی و در قالب یک تابع هدف توسعه داده شدند. برای نشان دادن توانایی مدل توسعه داده شده و بررسی عملکرد آن در شدت‌های کمبود آب متفاوت، ۱۳ سناریو برای شبکه توزیع دو حلقه‌ای نمونه تعریف شدند. جواب بهینه مدل بهینه‌سازی برای تمام سناریوها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی HBMO و ایجاد ارتباط آن با شبیه‌ساز EPANET به‌دست آمد. نتایج نشان دادند که مدل توسعه داده شده همراه با الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده، توانایی بالایی در یافتن برنامه زمانی بهینه تأمین نوبتی دارد و همچنین برخلاف مدل‌های پیشین قابلیت خود را حتی در شرایط کمبود آب شدید نیز

References

- Afshar, A., Bozorg Haddad, O., Mariño, M. A. & Adams, B. J., 2007, "Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation", *Journal of Franklin Institute*, 344(5), 452-462.
- Alperovits, E. & Shamir, U., 1977, "Design of optimal water distribution systems", *Water Resour. Res.*, 13(6), 885-900.
- Ameyaw E. E., Memon Fayyaz A. & Bicik J., 2013, "Improving equity in intermittent water supply systems", *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 62(8), 552-562.
- Andey, S.P. & Kelkar, P.S., 2009, "Influence of intermittent and continuous modes of water supply on domestic water consumption", *Water Resources Management*, 23(12), 2555-2566.

- Batish, R., 2003, "A new approach to the design of intermittent water supply networks", *World Water and Environmental Resources Congress*, Philadelphia, Pennsylvania, United States.
- Bozorg Haddad, O., Adams, B. J. & Mariño, M. A., 2008, "Optimum rehabilitation strategy of water distribution systems using the HBMO algorithm", *Journal of Water Supply Research and Technology*, 57(5), 337-350.
- Bozorg Haddad, O., Afshar, A. & Mariño, M. A., 2008, "Design-operation of multi-hydropower reservoirs: HBMO approach", *Journal of Water Resources Management*, 22 (12), 1709-1722.
- Bozorg Haddad, O., Afshar, A. & Marino, M., 2010, "Multireservoir optimization in discrete and continuous domains", *Proceeding of the ICE - Water Management*, 164 (2), 57-72.
- Bozorg Haddad, O., Afshar, A. & Marino, M.A., 2006, "Honey-bees mating optimization (HBMO) algorithm: A new heuristic approach for water resources optimization", *Water Resources Management*, 20(5), 661-680.
- Bozorg haddad, O., Mirmomeni, M., Zarezadeh Mehrizi, M. & Mariño, M. A., 2010, "Finding the shortest path with honey-bee mating optimization algorithm in project management problems with constrained/unconstrained resources", *Journal of Computational Optimization and Application*, 47(1), 97-128.
- Choe, K. & Varley, R., 1997, "Conservation and pricing-does raising tariffs to an economic price for water make the people worse?", Prepared for the Best Management Practice for water conservation workshop, South America.
- Duckstein, L. & Plate, E.G., 1988, "Engineering reliability and risk in water resources", *Clean-Soil, Air, Water*, 16(4), 451-452.
- Ghajarnia, N., Bozorg Haddad, O. & Marino, M. A., 2009, "Reliability based design of water distribution network (WDN) considering the reliability of nodal pressure", *World Environmental and Water Resources Congress*, Great Rivers, Kansas City, Missouri, USA, 5717-5725.
- Hashimoto, T., Stedinger, J.R. & Loucks, D.P., 1982, "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation", *Journal of Water Resources Research*, 18(1), 14-20.
- Jahanshahi, G. & Bozorg Haddad, O., 2008, "Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal design of water distribution systems", *World Environmental and Water Resources Congress*, Honolulu, Hawaii, United States.
- Jeong, H.S. & Abraham, D. M., 2006, "Water rationing model for water networks under short-term water supply shortage", *Pipelines Division Specialty Conf.*, Chicago, Illinois, United States.
- Karimi, S., Mostoufi, N. & Soutodeh Gharebagh, R., 2013, "Evaluating performance of Honey bee mating optimization", *Journal of Optimization Theory and Applications*, DOI: 10.1007/s10957-013-0336-2.
- Lund, J. R. & Reed, R., 1995, "Drought water rationing and transferable rations", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(6), 429-437.
- Marinakis, Y., Marinaki, M. & Matsatsinis, N., 2008, "A hybrid clustering algorithm based on honey bees mating optimization and greedy randomized adaptive search procedure", *Learning and Intelligent Optimization*, 5313, 138-152.
- Marinakis, Y., Marinaki, M. & Matsatsinis, N., 2008, "Honey bees mating optimization for the location routing problem", *Engineering Management Conference*, IEMC Europe 2008. IEEE International, Estaril.
- Mohan, S. & Jinesh Babu, K. S., 2010, "Optimal water distribution network design with honey-bee mating optimization", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(1), 117-126.

- Naik, B., Nayak, J. & Behera, H. S., 2015, "A honey bee mating optimization based gradient descent learning – FLANN (HBMO-GDL-FLANN) for Classification", *Emerging ICT for Bridging the Future - Proceedings of the 49th Annual Convention of the Computer Society of India CSI*, Volume 2, Advances in Intelligent Systems and Computing, 338, 211-220.
- Nasseri, M., Moeini, A. & Tabesh, M., 2011, "Forecasting monthly urban water demand using Extended Kalman Filter and Genetic Programming", *Expert Systems with Applications*, 38(6), 7387-7395.
- Nazif, S., Karamouz, M., Tabesh, M. & Moridi, A., 2010, "Pressure management model for urban water distribution networks", *Water Resources Research*, 24(3), 437-458.
- Niknam, T., 2009, "An efficient hybrid evolutionary algorithm based on PSO and HBMO algorithms for multi-objective Distribution Feeder Reconfiguration", *Journal of Energy Conversion and Management*, 5(8), 2074-2082.
- Seifollahi-Aghmiuni, S., Bozorg Haddad, O., Omid, M.H. & Mariño, M.A., 2011, "Long-term efficiency of water networks with demand uncertainty", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 164(3), 147-159.
- Seifollahi-Aghmiuni, S., Bozorg Haddad, O., Omid, M.H. & Mariño, M.A., 2013, "Effects of pipe roughness uncertainty on water distribution network performance during its operational period", *Water Resources Management*, 27(5), 1581-1599.
- Soltanjalili, M., Bozorg Haddad, O. & Marino, M.A., 2013, "Operating water distribution networks during water shortage conditions using hedging and intermittent water supply concepts", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(6), 644-659.
- Sushikumar, N., Mohankumar, M. S. & Sridharan, K., 2003, "Modelling an intermittent water supply", *World Water and Environmental Resources Congress*, Philadelphia, Pennsylvania, United States.
- Tabesh, M. & Dini, M., 2009, "Fuzzy and neuro-fuzzy models for short-term water demand forecasting in Tehran", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering*, 33(1), 61-77.
- Tabesh, M. & Saber, H., 2012, "A prioritization model for rehabilitation of water distribution networks using GIS", *Water Resources Management*, 26(1), 225-241.
- Tabesh, M., Shirzad, A., Arefkhani, V. & Mani, A., 2014, "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.
- Totsuka, N., Trifunovic, N. & Vairavamoorthy, K., 2004, "Intermittent urban water supply under water starving situation", *30th WEDC International Conference*, Vientiane, Lao PDR.
- Vairavamoorthy, K., 2010, "Water conservation in developing countries", Presentation at Water, Engineering and Development Center (WEDC), Loughborough University, UK.
- Vairavamoorthy, K., Gorantiwar, S. D. & Pathirana, A., 2008, "Managing urban water supplies in developing countries-climate change and water scarcity scenarios", *Physics and Chemistry of the Earth*, 33(5), 330-339.
- WHO, UNICEF, & WSSCC, 2000, *Global water supply and sanitation assessment- 2000 report*, WHO, Geneva, Switzerland.