

## مدیریت آب شهری تبریز با تأکید بر قابلیت اطمینان به کمک الگوریتم ارتقاء یافته مجموعه ذرات

حسن حاجی کاظمیان<sup>۱</sup>، مهدی ضرغامی<sup>۲\*</sup>، محمدعلی بادامچی زاده<sup>۳</sup> و محمدعلی قربانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تبریز

<sup>۴</sup> دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

### چکیده

خطوط انتقال از زربینه رود و نهند و آب‌های زیرزمینی (چاه‌ها و قنوت) منابع تأمین کننده اصلی آب کلان‌شهر تبریز را تشکیل می‌دهند. در این مقاله مدیریت تأمین آب این شهر، با توجه به اهداف اقتصادی، زیست محیطی و قابلیت اطمینان سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین کنترل نشت و تعمیر شبکه به عنوان یک راه‌کار مدیریت تقاضا دیده شده و وضعیت تأمین بهینه آب شهر تا سال ۱۴۰۲ استخراج شده است. این بررسی، با توجه به روند تغییرات جمعیتی شهر و تغییر در الگوی مصرف صورت پذیرفته و قابلیت اطمینان منابع آب به عنوان یک تابع هدف بهینه‌سازی و معیار ارزیابی عملکرد سیستم معرفی شده است. به منظور حل مساله بهینه‌سازی چند هدفه از برنامه‌ریزی سازشی استفاده و مدل با استفاده از الگوریتم معمولی و نیز ارتقاء یافته مجموعه ذرات (PSO) حل شده است. بررسی‌ها نشان دهنده‌ی کارایی بهتر در عملکرد الگوریتم توسعه یافته است. نتایج حل مدل، کفایت منابع فعلی آب شهر تا سال ۱۴۰۰ را نشان می‌دهند که البته با توجه به سطح اطمینان‌پذیری سیستم، به کارگیری یک منبع دیگر پس از آن ضروری است. در بخش دیگر حساسیت سیستم نسبت به وقوع شکست در هر یک از منابع بررسی شده که نشان دهنده حساسیت بالای سیستم نسبت به خط انتقال زربینه رود است.

**واژگان کلیدی:** مدیریت آب شهری، بهینه‌سازی چند هدفه، قابلیت اطمینان، تحلیل حساسیت، برنامه‌ریزی سازشی، الگوریتم مجموعه ذرات.

### ۱- مقدمه

متعدد انتقال آب اجرا شده و یا در دست بررسی و اجرا هستند. با ادامه روند رشد جمعیت شهر، مدیریت آینده‌نگر و یکپارچه به منظور تأمین آب شهر بی‌شک ضروری است. هزینه کلی تأمین آب، مسایل اجتماعی، تأثیرات سیاسی، کیفیت آب، سلامت و بهداشت عمومی، انعطاف‌پذیری، کنترل تقاضای آب، کاهش زمان کمبود آب از جمله معیارهایی هستند که ابریشم‌چی و همکاران در پژوهش خود به عنوان اهداف و معیارهای برنامه‌های مدیریت آب شهری بدان اشاره نمودند [۳]. همچنین می‌توان به برنامه تحقیقاتی ملی سوئد با عنوان "مدیریت پایدار آب شهری" اشاره نمود که به طور کلی عواملی چون معیارهای سلامت (کیفیت آب، ریسک عفونت و مسموم بودن آب)، معیارهای فرهنگی و اجتماعی، معیارهای زیست محیطی (همچون غلظت آب‌های زیرزمینی، گرمایش زمین، گسترش مواد سمی در آب، گسترش مواد سمی در لایه‌های خاک و استفاده از منابع طبیعی)، معیارهای اقتصادی (هزینه کلی طرح‌های آبی) و معیارهای اجرایی و فنی را به عنوان اهداف و معیارهای برنامه تحقیقاتی خود مورد نظر قرار دادند [۴]. در پژوهش فتاحی و فیاض سه تابع هدف هزینه شبکه توزیع آب، نشت آب و سطح رضایت‌مندی عمومی جامعه در شهر همدان به عنوان اهداف مدیریت آب شهری مورد ارزیابی قرار

افزایش جمعیت و شهرنشینی، توسعه صنعت و کشاورزی و ضعف مدیریت منابع آب به همراه خشکسالی‌ها و تغییرات اقلیمی، سبب بروز بحران آب در بسیاری از نواحی جهان شده است. به طوری که نیمی از مردم جهان برای رفع نیازهای ابتدایی خود به آب کافی دسترسی ندارند [۱]. مدیریت جامع منابع آب در راستای دستیابی به توسعه پایدار جوامع، بسیار مورد توجه قرار گرفته و به عنوان یکی از راه‌کارهای اساسی مقابله با بحران آب به کار گرفته شود. فرآیند مدیریت تأمین آب شهری اقدامات و تصمیماتی هستند که تعیین می‌کنند به چه میزان، چه وقت و از چه منابعی برای تأمین تقاضای شهروندان استفاده گردد. این تصمیمات برای ارضای اهداف مختلف در شرایط وجود محدودیت‌ها اتخاذ می‌شوند. چنین فرآیندی غالباً منجر به حل مسایل بهینه‌سازی چند هدفه مقید می‌شود [۲]. کشور ایران با دارا بودن تنها کمتر از یک سوم متوسط بارش جهانی، جزء کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان قرار می‌گیرد. شهر تبریز نیز با توجه به ازدیاد جمعیت و وجود و رشد مراکز متعدد صنعتی و کشاورزی با مشکل کمبود منابع آب روبه روست. به طوری که برای تأمین آب مورد نیاز شهر طرح‌های

۱. پایایی رخداد: تعداد دفعات عملکرد نامناسب سیستم را نسبت به کل دفعات مورد نظر بیان می‌دارد.

۲. پایایی زمانی: زمان عملکرد نامناسب سیستم را نسبت به کل بازه زمانی مورد ارزیابی بیان می‌کند.

۳. پایایی حجمی: که میزان (حجم) آب فراهم شده به متقاضیان را به کل آب مورد نیاز آنان بیان می‌کند [۱۰].

مفهوم قابلیت اطمینان توسط محققین در شبکه‌های آبرسانی به صورت نسبت جریان قابل دسترس خروجی به کل تقاضا مورد استفاده قرار گرفته است. تابش و کریم زاده در پژوهشی قابلیت اطمینان را به صورت یک قید در بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی شهری در نظر گرفتند [۱۱]. در پژوهشی دیگر Fujiwara و Ganesharajah روشی را برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تأمین و توزیع آب ارائه کردند. آن‌ها بخش‌های مختلف شبکه اعم از ایستگاه‌های پمپاژ، تصفیه‌خانه‌ها، شبکه توزیع، و مخازن را به عنوان مؤلفه‌های تشکیل دهنده‌ی مستقیم در نظر گرفتند و برای هر یک از این مؤلفه‌ها یک وضعیت عدم کارکرد مطلوب تعیین نمودند [۱۲]. علی‌رغم موفقیت تحقیقات گذشته لحاظ تابع هدفی برای سطح اطمینان سیستم در کنار اهداف دیگر به صورت همزمان در ادبیات فنی دیده نشده است.

در تحقیق حاضر سه تابع هدف حداقل هزینه تأمین آب، حداقل لطمات زیست محیطی و حداکثر سطح قابلیت اطمینان سیستم تأمین آب شهر تبریز به عنوان اهداف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. اطمینان‌پذیری سیستم تأمین آب به صورت توانایی حفظ عملکرد سیستم به منظور تأمین مناسب آب ساکنین و به صورت یک تابع غیرخطی تانژانت هیپربولیک در نظر گرفته شده است. استفاده از این تابع هدف در تحقیقات گذشته برای سیستم کلان تأمین آب کمتر به کار گرفته شده است و بیشتر در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع به کار رفته است. این مقاله به بررسی مدیریت تأمین آب شهر تبریز به صورت برنامه‌ای آینده‌نگر و دراز مدت از سال ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۲ می‌پردازد. در بخش دوم مطالعه موردی یعنی شهر تبریز و وضعیت تولید و مصرف آب در این شهر ارائه شده است. سپس در بخش سوم به ارائه مدل بهینه‌سازی و روش حل آن پرداخته شده که در این بخش نیز استفاده از الگوریتم توسعه یافته (PSOMS) نوآوری تحقیق بوده و در بخش چهارم، روش‌های مورد استفاده تجزیه و تحلیل شده‌اند و در پایان نتیجه‌گیری ارائه شده است.

گرفتند. در این پژوهش، محدودیت‌های حداقل تأمین تقاضای آب، محدودیت در منابع تأمین آب، محدودیت مخازن ذخیره، محدودیت ایستگاه‌های تصفیه آب به عنوان قیود در مسئله اعمال نشده است. در ادامه محققین با استفاده از روش برنامه‌ریزی سازشی این سه تابع هدف را در قالب یک تابع قرار داده و سپس با استفاده از نرم‌افزارهای بهینه‌یابی مدل را حل نموده‌اند [۵]. در مطالعه زرغامی و همکاران، مدیریت آب شهری زاهدان مورد بررسی قرار گرفته است. محققان معیارهای هزینه، تأمین آب مورد تقاضا و مخاطرات اجتماعی همراه با محدودیت‌های تأمین حداقل آب مورد نیاز شهروندان، محدودیت در منابع آب زیرزمینی و نیز هریک از منابع تأمین را برای بهینه‌سازی تأمین آب شرب شهر زاهدان در نظر گرفته‌اند [۶]. همانطور که اشاره شد فرآیند مدیریت آب شهری قابل تبدیل به یک مسأله بهینه‌سازی چند هدفه مقید است. برای حل چنین مسائلی از روش‌های مختلفی استفاده شده که به طور کلی دو رویکرد حل از طریق روش‌های مبتنی بر ریاضیات و حل با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند تصادفی مورد توجه قرار گرفته است. الگوریتم مجموعه ذرات<sup>۱</sup> یکی از الگوریتم‌های تکاملی است که توسط Kenedy و Eberhart [۷] ابداع شد. این روش براساس ایده حرکت دسته پرندگان برای یافتن غذا شکل گرفته است.

Liu و همکاران [۸] توانستند با اعمال یک جهش بر پایه شباهت ذرات الگوریتم را ارتقاء داده و تنوع ذرات را در تکرار حفظ نمایند. Juo و Yang [۹] نشان دادند که اعمال جهشی بر پایه شباهت (PSOMS) می‌تواند توانایی الگوریتم را در جستجوی فضای مسأله بالا برده و علاوه بر آن سبب کاهش نرخ همگرایی آن شود. پژوهشگران در تحقیق خود دو روش الگوریتم عادی و الگوریتم جهش یافته مجموعه ذرات و همچنین دو روش الگوریتم ژنتیک را برای حل مسأله طراحی خط تولید به کار گرفتند.

اطمینان‌پذیری سیستم‌های منابع آب توسط محققین به عنوان یک تابع هدف در مسایل مدیریت منابع آب مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، Kindler و همکاران [۱۰] در تحقیقی چند شاخص برای ارزیابی جنبه‌های پایایی سیستم‌های منابع آب ارائه کردند. آنها اطمینان‌پذیری (پایایی) را در سیستم‌های منابع آب به سه شکل کلی زیر تعریف کردند:

## ۲- روش‌شناسی

رود و  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت بین (۰و۱) هستند. به هر حال الگوریتم اولیه دارای مشکلاتی است. نرخ بالای همگرایی PSO اولیه سبب به دام افتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی می‌گردد. فرآیند همگرایی الگوریتم با سرعت بالا ممکن است سبب شود تا تمامی ذرات به سرعت، به یک نقطه (که غالباً بهینه سراسری نیست) همگرا شوند و تنوع پاسخها (ذرات) در فضای جستجو به سرعت کاهش می‌یابد. به منظور غلبه بر این مشکل محققین روش‌های متعددی را مورد استفاده قرار داده‌اند. Liu و همکاران [۸] توانستند با اعمال یک جهش بر پایه شباهت ذرات این مشکل را حل نموده و تنوع ذرات را در تکرارها حفظ نمایند. بدین منظور دو تعریف ارائه می‌شوند که تعریف اول شباهت دو ذره را به یکدیگر بیان می‌دارد.

$$s(i, j) = \begin{cases} 1 & d(i, j) < d_{\min} \\ 1 - \left[ \frac{d(i, j)}{s_{\max}} \right]^\beta & d_{\min} \leq d(i, j) \leq d_{\max} \\ 0 & d(i, j) > d_{\max} \end{cases} \quad (۴)$$

که در این روابط  $d(i, j)$  فاصله‌ی دو ذره  $i$  و  $j$  می‌باشد. این فاصله معمولاً براساس فاصله اقلیدسی محاسبه می‌گردد. پارامتر  $\beta$  مقداری ثابت است که غالباً یک در نظر گرفته می‌شود. این تعریف بیان می‌دارد که هر چه مقدار  $s$  بیشتر باشد دو ذره  $i$  و  $j$  شبیه‌تر هستند و برعکس. به منظور حفظ و افزایش تنوع ذرات در فضای جستجو بایستی مقدار  $s$  کاهش یابد. تعریف دوم میزان به هم پیوستگی ذرات در تکرار  $t$  ام است، که براساس رابطه‌ی (۵) تعریف می‌شود.

$$C(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s(i, g) \quad (۵)$$

که در این رابطه  $s(i, g)$  مقدار تشابه ذره  $i$  ام با برترین ذره تکرار  $t$  ام یعنی  $g$  است. در واقع مقدار  $C(t)$  میزان پخشودگی و تنوع ذرات را در تکرار  $t$  ام نشان می‌دهد.  $C(t)$  را می‌توان برای اندازه‌گیری تنوع ذرات مورد استفاده قرار داد. عملگر جهش بر اساس این دو تعریف تشکیل می‌گردد.

$$\begin{aligned} &\text{if } rand < \alpha * c(t) * s(i, j) \\ &\text{then } X_{id} = rand * (ub_d - lb_d) + lb_d \end{aligned} \quad (۶)$$

به منظور حل مسأله بهینه‌یابی می‌توان از دو رویکرد کلی استفاده نمود. در رویکرد نخست با استفاده از روش‌هایی چون مجموع وزنی ساده و یا برنامه‌ریزی سازشی مسأله چندهدفه به یک مسأله تک‌هدفه تبدیل شده و سپس حل می‌شود. در رویکرد دوم مسأله به صورت چندهدفه حل شده و پاسخ‌های بهینه غیرمغلوب به صورت مجموعه جواب ارائه می‌گردند. در این تحقیق از برنامه‌ریزی سازشی به منظور حل مسأله استفاده شده است. رابطه (۱) حالت کلی برنامه‌ریزی سازشی را بیان می‌کند [۱۳].

$$MinL_p = \left[ \sum_{j=1}^m w_j^p \left( \frac{f_j^* - f_j(x)}{f_j^* - f_j^w} \right)^p \right]^{1/p} \quad (۱)$$

که در این رابطه  $w$  وزن توابع هدف،  $f_j^*$  بهترین مقدار برای هدف  $j$  ام،  $f_j(x)$  مقدار جواب،  $f_j^w$  بدترین مقدار برای هدف هستند.  $p$  عاملی است که حساسیت تصمیم‌گیر را به میزان واریانس معیارها از آرمان بیان می‌دارد.

برای حل مدل تشکیل داده شده از الگوریتم مجموعه ذرات PSO استفاده شده است. این الگوریتم شبیه‌سازی یک رفتار دسته‌جمعی است که ایده اصلی آن از نحوه حرکت دسته پرنده‌ها و ماهیان نشأت گرفته است [۱۴]. اگر فضای جستجو یک فضای  $D$  بعدی باشد، ذره  $i$  از جمعیت با بردار  $D$  بعدی  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$  سرعت (تغییر مکان) این ذره با بردار  $D$  بعدی  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ ، بهترین مکان دیده شده با بردار  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$  و بهترین ذره در کل جمعیت با اندیس  $g$  نشان داده می‌شود. جمعیت ذرات مطابق دو معادله زیر به حرکت واداشته می‌شود:

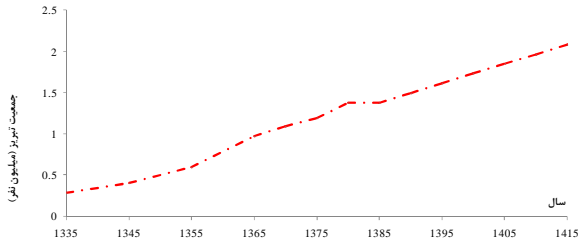
$$v_{id}^{n+1} = x(w_{id}^n + c_1 r_1^n (p_{id}^n - x_{id}^n) + c_2 r_2^n (p_{pg}^n - x_{id}^n)) \quad (۲)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (۳)$$

که در این روابط  $d=1, 2, \dots, D$  و  $i=1, 2, \dots, N$  و  $N$  برابر با اندازه جمعیت،  $n$  شماره تکرار،  $\omega$  وزن اینرسی،  $c_1$  و  $c_2$  دو ثابت مثبت، به نام‌های ضرایب شناخت و اجتماعی،  $x$  فاکتور انقباض که می‌تواند مانند  $\omega$  برای محدود کردن سرعت به کار

داشت که بر این اساس میزان جمعیت شهر برای پیش‌بینی تقاضا برآورد خواهد شد.

$$P = P_0 \left(1 + \frac{r}{100}\right)^n \quad (7)$$



شکل ۱- پیش‌بینی روند رشد جمعیت تبریز تا سال ۱۴۱۵

شکل (۲) روند تولید و مصرف آب را در سال‌های اخیر در شهر تبریز نشان می‌دهد.

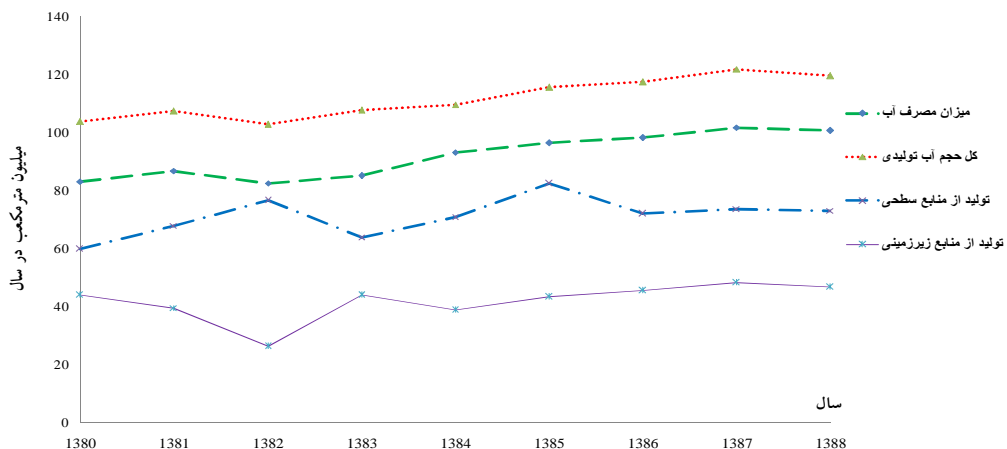
منابع تأمین آب شهر تبریز شامل منابع زیرزمینی و منابع سطحی می‌باشد. منابع زیرزمینی (چاه‌ها و قنوات) نخستین منبع تأمین آب شهر تبریز می‌باشند، به طوری که احداث و بهره‌برداری از نخستین چاه‌ها در اواسط دهه سی آغاز گردید. در حال حاضر تعداد ۸۷ حلقه چاه در شبکه تولید آب شهر مورد بهره‌برداری قرار دارند که توان تولید ۱۶۲۲ لیتر آب در ثانیه را (۵۱/۵ میلیون مترمکعب در سال) دارا می‌باشند. همچنین قنوات فعال تبریز نیز قادر به تولید ۱۵۰ لیتر در ثانیه (۴/۷۳ میلیون مترمکعب در سال) می‌باشند [۱۵].

در رابطه‌ی اخیر  $rand$  یک عدد تصادفی و  $\alpha$  ضریبی ثابت است.  $ub_d$  و  $lb_d$  حداقل و حداکثر مرزهای بعد  $d$  ام هستند. از روابط فوق بر می‌آید که ذرات دارای تشابه بیشتر به برترین ذره  $p_g$  احتمال بیشتری برای این تغییر دارند. به منظور ایجاد تعادل در این فرآیند ضریب  $\alpha$  به صورت خطی با افزایش گام‌ها کاهش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داده است که بیشتر بودن مقدار  $\alpha$  احتمال جهش را افزایش داده و سرعت الگوریتم را کاهش می‌دهد و در سوی مقابل قابلیت و توانایی جستجوی الگوریتم را ارتقا می‌دهد.

لذا در این تحقیق به عنوان یک فعالیت جدید، هم روش PSO معمولی و هم روش توسعه یافته آن یعنی PSOMS مدل شده و توانایی آن‌ها برای حل مساله مدیریت آب شهری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق به عنوان نوآوری نسبت به کار قبلی [۱۴] قابلیت اعتماد به سیستم و نیز میزان شکست آن بررسی خواهد شد.

### ۳- مطالعه موردی

شهر تبریز در غرب استان آذربایجان شرقی و در جنوب شرقی جلگه تبریز واقع شده است. دشت تبریز و شهر تبریز بخشی از حوزه آبریز رودخانه آجی‌چای می‌باشند. اقلیم ناحیه نیمه‌خشک، سرد با زمستان‌هایی نسبتاً طولانی می‌باشد. بر اساس آخرین سرشماری نفوس و مسکن توسط مرکز آمار ایران، جمعیت تبریز ۱۳۷۸۹۳۵ نفر در سال ۱۳۸۵ بوده است که با نرخ رشد جمعیت متوسط سالانه ۱/۷ درصد، جمعیت شهر بر اساس رابطه آماری (۷) به صورت شکل (۱) افزایش خواهد



شکل ۲- روند فعلی مصرف و تولید آب در شهر تبریز

تابع هزینه  $C_t$  برابر با مجموع ضرب قیمت واحد هر یک از منابع (ریال برای هر مترمکعب) در مقدار آب تأمین شده از آن منبع (بر حسب میلیون متر مکعب در سال) است که در نتیجه واحد تابع هزینه برابر میلیون ریال در سال خواهد بود.

$$\text{Min } C_t = 260 \times G_t + 4257 \times Z_t + 1977 \times N_t + 1700 \times D_t \quad (۸)$$

برداشت بی‌رویه از رودخانه‌ها سبب به خطر افتادن محیط‌زیست پایین‌دست آن‌ها می‌شود. زرينه‌رود یکی از شریان‌های اصلی تأمین کننده آب دریاچه ارومیه می‌باشد که به منظور حفظ دریاچه ارومیه برداشت از خط انتقال زرينه‌رود به تبریز نسبت به کل آب تأمین شده حداقل می‌گردد. لذا تابع هدف دوم مسایل زیست محیطی  $E_t$  بوده و هدف کاهش آن است.

$$\text{Min } E_t = \frac{Z_t}{G_t + Z_t + N} \quad (۹)$$

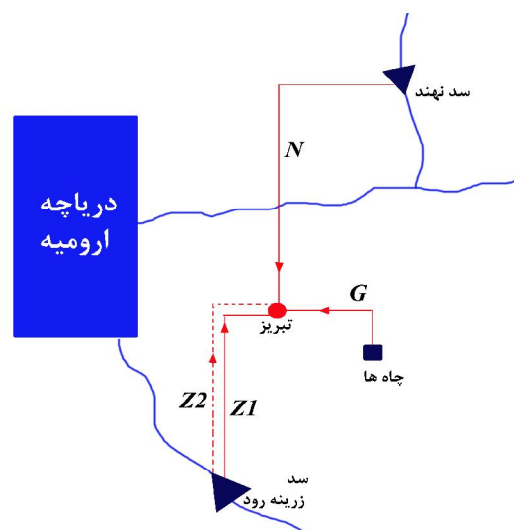
اولین و اساسی‌ترین هدف سیستم، تأمین آب شهروندان با کمیت مناسب می‌باشد. واضح است رضایت‌مندی ساکنین در گرو تأمین آب به مقدار مناسب است. مقدار سرانه آب تأمین شده در شبکه  $S_t$  به صورت رابطه (۱۰) بیان می‌گردد.

$$S_t = \frac{(1-l_c) \times ((G_t + Z_t + N_t) + D_t)}{\text{population}} \quad (۱۰)$$

که در این رابطه  $l_c$  ضریب نشت است که معادل ۲۰ درصد فرض می‌شود. همان‌طور که اشاره شده، قابلیت اطمینان سیستم بیانگر احتمال صحت عملکرد سیستم در یک بازه زمانی مشخص و تحت شرایط کارکرد خاص تعریف می‌شود. در واقع رخداد شکست می‌تواند عملکرد سیستم را تحت تأثیر قرار داده و میزان این قابلیت را کاهش دهد. وظیفه سیستم مورد مطالعه در این پژوهش، تأمین آب با کمیت مناسب برای تمام متقاضیان (شهروندان) می‌باشد. در حقیقت شکست در سیستم سبب کاهش اعتمادپذیری به صورت عدم تأمین آب کافی برای شهروندان خواهد شد. از این‌رو قابلیت اطمینان سیستم تأمین آب تبریز، به صورت نسبت آب تأمین شده توسط سیستم به مقدار آب مورد تقاضای شهروندان تعریف می‌شود (رابطه (۱۱)). این مقدار تقاضا براساس اعلام شرکت آب و فاضلاب استان

اما بخش عمده آب تبریز از منابع سطحی تأمین می‌شود. خط انتقال آب از محل سد نهند در ۴۳ کیلومتری شمال شرق تبریز، سالانه قادر به انتقال ۲۵ میلیون مترمکعب آب در سال به شهر تبریز می‌باشد. این خط انتقال در سال ۱۳۷۲ به بهره‌برداری رسیده است [۱۶]. سد نوروزلو بر روی رودخانه زرينه‌رود دیگر منبع حیاتی تأمین آب است. این طرح شامل دو خط انتقال است که خط نخست آن در حال بهره‌برداری بوده و توانایی انتقال ۸۸/۳ میلیون مترمکعب در سال را داراست. خط دوم انتقال آب نیز هم اکنون در حال اجراست [۱۷]. شکل (۳) به طور نمادین منابع تأمین آب شهر تبریز را نشان می‌دهد. نشت از شبکه توزیع از عواملی است که همواره وجود داشته و سبب کاهش مقدار آب تولید شده می‌شود. درصد آب نشت‌یافته از شبکه آب شهر تبریز ۲۰ درصد کل آب تولید شده برای شبکه توزیع آب در نظر گرفته شده است. آب حاصل از عملیات نشت‌یابی و تعمیرات شبکه نیز به عنوان یک منبع دیگر آب در نظر گرفته می‌شود.

در این تحقیق سه تابع هدف حداقل هزینه کل تأمین آب، حداقل آسیب‌های زیست محیطی و حداکثر قابلیت اطمینان سیستم برای تأمین آب شهر تبریز در نظر گرفته شده است. متغیرهای تصمیم در این مساله بهینه‌سازی، میزان برداشت از هر یک از منابع، به ترتیب برای منابع زیرزمینی  $G_t$ ، خط انتقال آب زرينه‌رود  $Z_t$ ، خط انتقال از نهند  $N_t$  و آب تأمین شده از نشت‌یابی و تعمیرات  $D_t$  هستند، که هدف تعیین مقدار بهینه برای هر یک از این متغیرهاست.



شکل ۳- شکل شماتیک منابع تأمین آب شهر تبریز

همچنین برای تابع نرمال شده لطمات زیست محیطی مقدار آرمانی برابر صفر و مقدار نامطلوب برابر صددرصد یا ۱ است.

$$\text{Min } L_2 = \left[ w_c^2 \left( \frac{0 - C_t}{0 - 4342700} \right)^2 + w_s^2 \left( \frac{1 - M_t}{1 - 0} \right)^2 + w_e^2 \left( \frac{0 - E_t}{0 - 1} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

$w_c$ ،  $w_s$  و  $w_e$  ضرایب اهمیت توابع هدف هزینه، قابلیت اطمینان و صدمات زیست محیطی می‌باشند. در این قسمت محدودیت‌ها بایستی آورده شوند. برداشت از هر یک از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی با محدودیت همراه است. همچنین حداکثر آب ناشی از تعمیرات و نشت‌یابی شبکه نیز محدود می‌باشد و سازمان‌های مربوط توان بازیافت تمام ۲۰ درصد آب نشت‌یافته را ندارند. به طور متوسط ۲۵ درصد کل مقدار آب نشت‌یافته را می‌توان بازیافت کرد. بر این اساس سیود زیر مساله را محدود می‌نماید:

$$0 \leq G_t \leq 51.18 \quad (14)$$

$$0 \leq Z_t \leq 88.30 \quad (15)$$

$$0 \leq N_t \leq 23.00 \quad (16)$$

$$0 \leq D_t \leq 0.25 \times l_c \times (G_t + Z_t + N_t) \quad (17)$$

همچنین لازم به ذکر است که منابع آب موجود در هر یک از منابع فوق تابع شرایط اقلیمی و خشک‌سالی بوده و در این تحقیق تأثیر تغییر اقلیم و خشک‌سالی روی این متغیرها مطالعه نشده است.

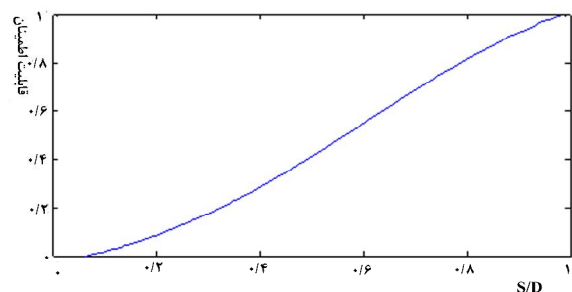
در ایجاد مدل مجموعه ذرات، مکان هر ذره در تکرار پایانی معرف یک پاسخ خواهد بود. با توجه به بررسی مساله در ۱۵ سال و وجود ۴ منبع تأمین آب، هر پاسخ دارای ۶۰ آرایه می‌باشد که بیانگر میزان برداشت از هر منبع در هر سال است. بنابراین هر ذره از جمعیت، دارای ۶۰ بعد بوده و همچنین فضای جستجوی مساله براساس حداکثر برداشت از منابع (روابط ۱۴ تا ۱۷) محدود می‌گردد.

آذربایجان شرقی ۱۹۰ لیتر در روز (۷۱ مترمکعب در سال) در نظر گرفته شده است [۱۵]. به منظور درنظر گرفتن رشد مصرف سرانه در اثر توسعه یافتگی و تغییر الگوی مصرف، سالانه یک درصد افزایش در آن منظور شده است. از سوی دیگر مفهوم بیان شده برای قابلیت اطمینان می‌تواند بیانگر سطح رضایت‌مندی ساکنین نیز باشد، به طوری که رضایت مردم در گرو هر چه بیشتر تأمین شدن آب  $S_t$  نسبت به تقاضایشان  $D_t$  در سال  $t$  است. از طرفی این رضایت‌مندی به صورت غیرخطی با حاصل کسر اخیر تغییر می‌نماید. چنانچه اگر میزان حاصله به کمتر از ۵۰ درصد کاهش یابد، سطح رضایت مردم بیش از آن (۶۰ تا ۷۰ درصد) کاهش می‌یابد [۱۸]. با توجه به موارد یاد شده، تابع تانزانت هیپربولیک براساس رابطه (۱۲) برای قابلیت اطمینان سیستم در نظر گرفته شده است که به طور مؤثر سطح رضایت‌مندی متقاضیان را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

$$R_t = \frac{S_t}{D_t} \quad (11)$$

$$\text{Max } M_t = 0.5 + 0.5 \times \tanh(2(\frac{S_t}{D_t}) - 1.2) \quad (12)$$

با استفاده از برنامه‌ریزی سازشی رابطه (۱) و مقدار متداول  $p=2$  تابع هدف نهایی با ترکیبی از سه تابع هدف بیان شده به صورت رابطه (۱۳) خواهد بود. مقدار آرمانی برای تابع هدف هزینه صفر فرض شده و مقدار نامطلوب برابر حداکثر مقدار ممکن برای هزینه است که در صورت حل مساله بیشینه کردن هزینه بدون لحاظ سایر اهداف برابر عدد ۴۳۴۲۷۰۰ میلیون ریال در سال حاصل خواهد شد. مقدار ارمان برای تابع قابلیت اطمینان صد درصد یا یک و مقدار نامطلوب برابر صفر درصد است.



شکل ۴- تابع عضویت قابلیت اطمینان سیستم تأمین آب تبریز

## ۴- نتایج و بحث

در حل مسائل از طریق برنامه‌ریزی سازشی همان‌طور که در رابطه اخیر نیز قابل ملاحظه است، یکی از عوامل مهم، وزن نسبی توابع هدف می‌باشد. این ضرایب با توجه به اهمیت اهداف و اولویت‌بندی آن‌ها از دید تصمیم‌گیر تعیین می‌شوند و مجموع آن‌ها یک فرض شده است. تغییر هر باره این ضرایب می‌تواند پاسخی جدید را ایجاد نماید. در واقع از آنجا که دسترسی به مقدار وزن‌های دقیق مورد نظر همه تصمیم‌گیرندگان و ذینفعان در دسترس نبوده تحلیل حساسیت لازم است. جدول (۱) ده سناریوی ضریب وزن معیارها و نتایج حل مدل را برای سال ۱۳۸۸ با استفاده از الگوریتم اولیه مجموعه ذرات که کد آن در محیط MATLAB نوشته شده نشان می‌دهد.

با توجه به این که حل مسأله برای تمام سناریوها و نمایش نتایج در این مقاله قابل ارائه نیست، لذا نتایج حل مسأله در ادامه برای حالت سناریوی یک نمایش داده می‌شود. همان‌طور که از ارقام جدول (۱) مشخص است، این سناریو در ضمن داشتن مقدار تابع هدف نهایی مناسب، هزینه و آسیب کمتری را نیز به همراه دارد. در حقیقت در این سناریو تعادل مناسبی بین اهداف بهینه‌سازی، با توجه ویژه به حفظ محیط زیست دریاچه ارومیه برقرار شده است و این در حالی است که هزینه نیز نسبت به سایر سناریوها در سطح بالایی قرار دارد. با حل مدل، نتایج تخصیص بهینه و تابع هدف برای حل با الگوریتم توسعه یافته در جدول (۲) ارائه شده است.

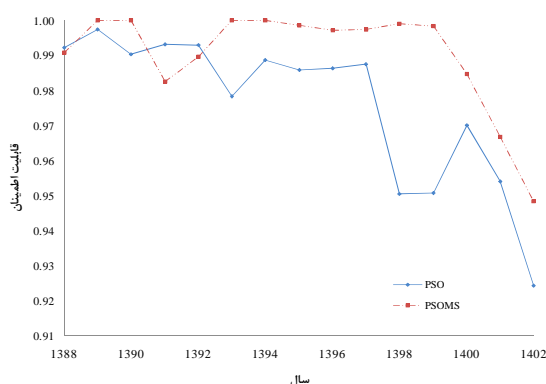
## جدول ۱- سناریوهای وزنی مختلف تعریف شده و حل مدل با

## استفاده از الگوریتم PSO در سال ۱۳۸۸

	$w_c$	$w_s$	$w_e$	M	E	C	OBF
۱	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۴۰	۱/۰۰	۰/۴۲۱	۳۰۶۲۰۰	۰/۲۳۷
۲	۰/۴۰	۰/۲۵	۰/۳۵	۱/۰۰	۰/۴۱۷	۲۹۵۶۹۴	۰/۱۹۴
۳	۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۲۵	۱/۰۰	۰/۴۵۰	۳۲۸۶۱۶	۰/۲۵۹
۴	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۶۰	۱/۰۰	۰/۵۱۴	۳۶۷۷۳۷	۰/۳۲۱
۵	۰/۶۰	۰/۲۰	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۵۳۸	۳۹۱۹۸۲	۰/۱۴۵
۶	۰/۲۰	۰/۶۰	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۶۳۲	۴۳۵۷۷۰	۰/۳۰۲
۷	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۳	۱/۰۰	۰/۴۴۵	۳۱۴۰۵۴	۰/۲۲۰
۸	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۵۴۱	۳۸۷۹۴۷	۰/۰۸۹
۹	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۵۴۳	۴۴۵۳۵۲	۰/۳۷۶
۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۴۴۶	۳۲۲۶۶۸	۰/۴۴۶

نتایج نشان می‌دهند که مدل با استفاده از منابع آب فعلی تنها تا سال ۱۴۰۱ قادر به ارائه پاسخ‌های بهینه مناسب بوده و در حقیقت پس از آن سطح اطمینان‌پذیری سیستم تأمین آب شهر تبریز به کمتر از ۹۵ درصد می‌رسد و افت اطمینان به سیستم با شیب تندی ادامه می‌یابد. این کاهش قابلیت اطمینان به معنای کاهش تأمین آب نسبت به نیاز شهروندان می‌باشد. همان‌طور که ارقام سطرهای پایانی جدول (۲) نشان می‌دهند، در سه سال پایانی تمام منابع با ظرفیت کامل مورد بهره‌برداری قرار خواهند گرفت. در واقع نتایج حل مدل نشان دهنده برداشت حداکثری و ثابت از منابع زیرزمینی و خط انتقال نهند به تبریز می‌باشد. روند تغییرات مقدار قابلیت اطمینان، نشان دهنده افت این قابلیت در سال‌های انتهایی بازه مورد بررسی است. برای جلوگیری از افت عملکرد سیستم و حفظ قابلیت اطمینان آن، پس از سال ۱۴۰۲ استفاده از یک منبع دیگر (خط دوم انتقال زیرنه‌رود) ضروری است.

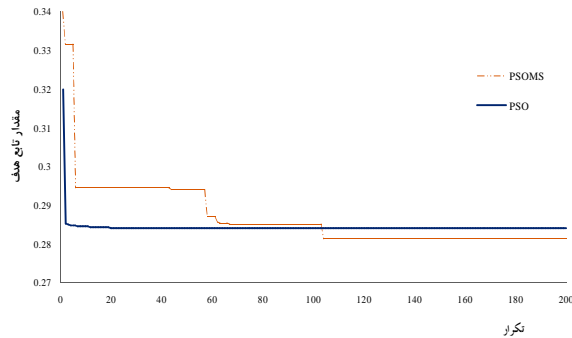
همان‌طور که نتایج جدول (۲) نشان می‌دهند، مجموع مقادیر تابع هدف نهایی برای بازه زمانی نخست ۰/۲۳۷ برای الگوریتم ارتقاء یافته است، این مقدار برای الگوریتم اولیه ۰/۲۲۸ می‌باشد که نشان‌دهنده کاهش و در نتیجه بهبود کیفیت پاسخ نهایی مدل با افزودن اپراتور جهش به الگوریتم اولیه است. همچنین نتایج تابع قابلیت اطمینان سیستم، یکنواختی بهتر پاسخ‌ها در طول بازه زمانی و نیز کیفیت بهتر این قابلیت را توسط الگوریتم توسعه یافته نشان می‌دهد. شکل (۵) چگونگی تغییرات تابع قابلیت اطمینان سیستم را برای هر دو روش نشان می‌دهد. روند تغییرات نشان دهنده افت محسوس قابلیت اطمینان در سال‌های انتهایی به‌خصوص بعد از سال ۱۴۰۰ است. همچنین منحنی نشان دهنده افزایش کیفیت و یکنواختی پاسخ‌ها در صورت استفاده از الگوریتم ارتقاء یافته است.



شکل ۵- تغییرات قابلیت اطمینان سیستم در سال‌های

۱۳۸۸ تا ۱۴۰۲

همان‌طور که ارقام جدول (۳) نشان می‌دهند، در این بخش پنج سطح شکست در هر یک از منابع در نظر گرفته شده و مدل برای سال بحرانی ۱۴۰۰ با اعمال شرایط وقوع خطر حل شده است.



شکل ۶- نمودار همگرایی دو الگوریتم برای حل مسأله در سال ۱۴۰۰

یکی از خصوصیات مهم الگوریتم‌های تکاملی، نحوه همگرایی آن‌ها به پاسخ بهینه است. شکل (۶) نمودار همگرایی دو روش را برای حل مسأله در سال ۱۴۰۰ نشان می‌دهد. افزودن عملگر جهش به الگوریتم معمولی سبب کاهش سرعت همگرایی و در مقابل رسیدن به پاسخ برتر می‌شود. در حقیقت این اپراتور با افزودن توان جستجوی ذرات در فضای مسأله و با کند کردن روند جستجو با پراکندن بیشتر ذرات در این فضا، سبب ارتقاء پاسخ‌های نهایی به دست آمده شده و الگوریتم را از به دام افتادن در بهینه‌های محلی باز می‌دارد [۱۴]. براین اساس در ادامه تحقیق از الگوریتم ارتقاء یافته برای حل مدل استفاده شده است. در ادامه، حساسیت مدل بهینه‌سازی و به بیان بهتر سیستم تأمین آب شهر تبریز نسبت به وقوع خطرات شکست در هر یک از منابع مورد تحلیل قرار گرفته و عملکرد شبکه تأمین آب تبریز در مواجهه با چنین وضعیتی ارزیابی می‌گردد. بروز حوادثی چون سیل، زلزله، انفجار و خرابکاری، مسمومیت خطوط و مخازن می‌تواند سبب بروز خطرات و شکست در عملکرد سیستم شود. شکست در سیستم به صورت اعمال درصدی از توان تولید آب هر یک از منابع، در محدودیت‌های مدل اعمال شده است.

جدول ۲- نتایج حل مدل تا سال ۱۴۰۲ با استفاده از الگوریتم ارتقاء یافته مجموعه ذرات با سناریوی اول وزن معیارها

سال	G (MCM/Y)	Z (MCM/Y)	N (MCM/Y)	D (MCM/Y)	OBF
۱۳۸۸	۵۱/۱۸	۴۸/۲۰	۲۳/۰۰	۹/۲۵	۰/۲۲۸
۱۳۸۹	۵۱/۱۸	۵۶/۶۱	۲۱/۷۹	۱۰/۳۲	۰/۲۳۵
۱۳۹۰	۵۱/۱۸	۵۷/۱۳	۲۳/۰۰	۱۰/۵۰	۰/۲۳۸
۱۳۹۱	۵۱/۱۸	۵۷/۱۰	۲۱/۸۵	۱۰/۳۹	۰/۲۴۳
۱۳۹۲	۵۱/۱۸	۶۰/۵۳	۲۳/۰۰	۱۰/۷۸	۰/۲۴۴
۱۳۹۳	۵۱/۱۸	۶۸/۹۵	۲۳/۰۰	۱۱/۴۵	۰/۲۴۹
۱۳۹۴	۵۱/۱۸	۶۹/۴۲	۲۳/۰۰	۱۱/۴۹	۰/۲۵۳
۱۳۹۵	۵۱/۱۸	۷۴/۷۱	۲۳/۰۰	۱۱/۷۵	۰/۲۵۶
۱۳۹۶	۵۱/۱۸	۷۶/۰۷	۲۳/۰۰	۱۲/۰۲	۰/۲۶۰
۱۳۹۷	۵۱/۱۸	۷۹/۷۷	۲۳/۰۰	۱۲/۳۲	۰/۲۶۴
۱۳۹۸	۵۱/۱۸	۸۳/۸۶	۲۳/۰۰	۱۲/۶۴	۰/۲۶۸
۱۳۹۹	۵۱/۱۸	۸۷/۵۴	۲۳/۰۰	۱۲/۹۴	۰/۲۷۱
۱۴۰۰	۵۱/۱۸	۸۸/۳۰	۲۳/۰۰	۱۳/۰۰	۰/۲۷۵
۱۴۰۱	۵۱/۱۸	۸۸/۳۰	۲۳/۰۰	۱۳/۰۰	۰/۲۸۱
۱۴۰۲	۵۱/۱۸	۸۸/۳۰	۲۳/۰۰	۱۳/۰۰	۰/۲۹۲



جدول ۳- نتایج نهایی حل مدل در شرایط وقوع شکست در منابع آبرسانی تبریز

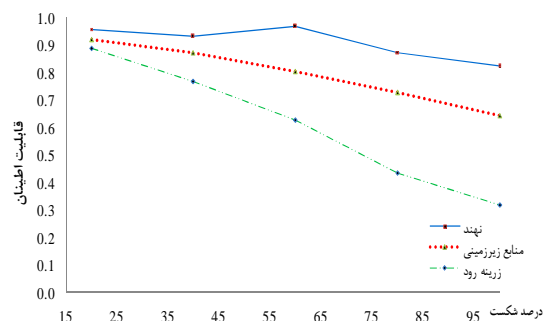
شماره حالت	میزان شکست	G (MCM/Y)	Z (MCM/Y)	N (MCM/Y)	D (MCM/Y)	M	E	C	OBF
۱	بدون شکست	۵۱/۱۸	۸۸/۳۰	۲۳/۰۰	۱۲/۹۹۸	۰/۹۸۵	۰/۵۴۳	۴۵۶۷۷۰	۰/۲۸۴
۲	منابع آبرسانی زیرزمینی	۲۰	۴۰/۹۴	۸۸/۳۰	۲۳/۰۰	۱۰/۱۵۶	۰/۹۲۰	۴۴۹۲۷۰	۰/۳۰۹
۳		۴۰	۳۰/۷۱	۸۸/۳۰	۲۳/۰۰	۱۱/۳۵۳	۰/۸۷۲	۴۴۸۶۲۰	۰/۳۳۳
۴		۶۰	۲۰/۴۷	۸۸/۳۰	۲۳/۰۰	۱۰/۵۴۲	۰/۸۰۴	۴۴۴۶۱۰	۰/۳۶۳
۵		۸۰	۱۰/۲۴	۸۸/۳۰	۲۳/۰۰	۹/۷۲۳	۰/۷۲۷	۴۴۰۵۶۰	۰/۳۹۸
۶		۱۰۰	۰/۰۰	۸۸/۳۰	۲۳/۰۰	۸/۹۰۴	۰/۶۴۲	۴۳۶۵۰۰	۰/۴۳۸
۷	خط انتقال زربنه رود	۲۰	۵۱/۱۸	۷۰/۶۴	۲۳/۰۰	۱۱/۵۸۶	۰/۸۹۰	۳۷۹۱۹۰	۰/۲۹۰
۸		۴۰	۵۱/۱۸	۵۲/۹۸	۲۳/۰۰	۱۰/۱۷۳	۰/۷۷۰	۳۰۱۶۱۰	۰/۳۰۶
۹		۶۰	۵۱/۱۸	۳۵/۳۲	۲۳/۰۰	۸/۷۶۰	۰/۶۲۷	۲۲۴۰۳۰	۰/۳۳۲
۱۰		۸۰	۵۱/۱۸	۱۷/۶۶	۲۳/۰۰	۳/۵۸۳	۰/۴۳۵	۱۴۰۰۵۰	۰/۳۸۱
۱۱		۱۰۰	۵۱/۱۸	۰/۰۰	۲۳/۰۰	۵/۹۳۴	۰/۳۲۰	۶۸۸۶۶	۰/۴۱۳
۱۲	خط انتقال نهند	۲۰	۵۱/۱۸	۸۸/۳۰	۱۸/۴۰	۱۲/۹۸۷	۰/۹۵۹	۴۴۵۹۵۰	۰/۲۹۴
۱۳		۴۰	۵۱/۱۸	۸۸/۳۰	۱۳/۸۰	۱۱/۳۸۱	۰/۹۳۳	۴۳۵۸۳۰	۰/۳۰۵
۱۴		۶۰	۵۱/۱۸	۸۸/۳۰	۹/۲۰	۵/۳۲۹	۰/۸۶۸	۴۱۶۴۵۰	۰/۳۲۵
۱۵		۸۰	۵۱/۱۸	۸۸/۳۰	۴/۶۰	۳/۱۵۴	۰/۸۲۳	۴۰۳۶۶۰	۰/۳۴۲
۱۶		۱۰۰	۵۱/۱۸	۸۸/۳۰	۰/۰۰	۷/۰۳۶	۰/۸۲۵	۴۰۱۱۶۰	۰/۳۴۷

ملاحظه می‌گردد با وقوع شکست در خط زربنه رود سطح قابلیت اطمینان به شدت رو به کاهش می‌گذارد. احداث چاه‌های جدید و نگهداری و احیای چاه‌های متروکه، احداث خط دوم انتقال آب زربنه رود، انتقال آب از منابع دیگر همچون رود ارس و همچنین مدیریت و کاهش تقاضا، ارتقاء فرهنگ صرفه‌جویی و مصرف صحیح و تصفیه و بازچرخایی آب راه‌کارهایی هستند که می‌توانند ضریب اطمینان سیستم را بهبود دهند.

#### ۵- نتیجه‌گیری

مسئله مدیریت آب شهری تبریز، به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. سه تابع هزینه، صدمات زیست‌محیطی و قابلیت اطمینان به عنوان اهداف بهینه‌سازی این مسئله در نظر گرفته شد که مدل با توجه به افزایش جمعیت برای بازه زمانی ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۲ حل و بررسی شد. برای حل مدل از الگوریتم مجموعه ذرات استفاده و به منظور ارتقاء عملکرد الگوریتم اولیه از یک عملگر جهش بر پایه شباهت ذرات بهره گرفته شده است. براساس نتایج، با

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، وقوع شکست در خط انتقال زربنه رود عملکرد سیستم را بسیار تحت تأثیر قرار داده و سبب افت شدید در قابلیت اطمینان در سطوح بالای شکست می‌شود که این اثرات در مورد منابع زیرزمینی و خط انتقال نهند در جایگاه بعدی قرار دارند. تغییرات مقادیر قابلیت اطمینان سیستم در شرایط وقوع این وضعیت در شکل (۷) نشان داده شده‌اند.



شکل ۷- تغییرات تابع قابلیت اطمینان در برابر شکست در هر یک از منابع تأمین آب

الگوریتم توسعه یافته PSO"، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ۱۳۸۹.

- [3] Abrishamchi, A., Ebrahimian, A., Tajrishi, M., Marino, A., M., "Case Study: Application of Multicriteria Decision Making to Urban Water Supply", *Water Resources Planning and Management*, 2005, 131, 326-335.
- [4] Hellström, D., Jeppsson, U., Karrman, E., "A Framework for System Analysis of Sustainable Urban Water Management", *Environmental Impact Assessment Review*, 2000, 20 (3), 311-321.
- [5] Fattahi, P., Fayyaz, S., "A Compromise Programming Model to Integrated Urban Water Management", *Water Resource Management*, 2009, 21(1), 4-19.
- [6] Zarghami, M., Abrishamchi, A., Ardakanian, R., "Multi-criteria Decision Making for Integrated Urban Water Management", *Water Resource Management*, 2007, 22 (8), 1017-1029.
- [7] Kennedy, J., Eberhart, R., "Particle Swarm Optimization", *Proc. of the International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 27 Nov- 01 Dec., 1995, pp 1944-1948.
- [8] Liu, J., Fan, X., Qu, Z. "An improved Particle Swarm Optimization with Mutation Based on Similarity", *Third International Conference of Natural Computation*. Haikou, China, 24-27 August, 2007, pp 824-828.
- [9] Juo, R., J., Yang, C., Y., "Simulation Optimization Using Particle Swarm Optimization Algorithm with Application to Assembly Line Design", *Applied Soft Computing*, 2011, 11 (1), 605-613.
- [10] Kindler, J., Kundzewicz, Z.W., "Multiple Criteria for Evaluation of Reliability Aspects of Water Resource Systems", *Modelling and Management of Sustainable Basin-Scale Water Resource Systems*, IAHS XXI General Assembly of IUGG, Boulder, CO., IAHS Publ. No. 231, 10-14 July 1995, 217-224.

[۱۱] تابش، م.، کریمزاده، آ.، "بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی شهری با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان و رابطه دی- فشار در گر‌ها"، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۲، ۳۷، (۲)، ۱۹۹-۲۱۱.

- [12] Fujiwara, O., Ganesharajah, T., "Reliability Assessment of Water Supply System with Storage and Distribution Network", *Water Resources Research*, 1993, 29 (8), 2917-2942.

افزودن این عملگر توانایی جستجوی الگوریتم افزایش یافته و ضمن جلوگیری از به دام افتادن ذرات در بهینه‌های محلی، پاسخ‌های با کیفیت‌تر و یکنواخت‌تر به دست آمده است. در حالی که افزودن آن تا حدودی سبب کندشدن الگوریتم در یافتن پاسخ‌های بهینه سراسری شده است. در عین حال نقطه بهینه بهتری حاصل می‌شود. براساس نتایج نهایی منابع زیرزمینی، برداشت از خط نخست انتقال از زرينه‌رود و خط انتقال نهند تنها قادر به تأمین آب مورد نیاز شهر تا سال ۱۴۰۰ می‌باشد و پس از آن برای حفظ عملکرد سیستم تأمین آب باید منبع تأمین جدیدی اضافه شود. با حل مسأله، مقادیر بهینه برداشت از هر یک از منابع برای سال‌های مورد بررسی به دست آمد. در بخش واپسین تحقیق، وقوع شکست در هر یک از منابع در نظر گرفته شده و مدل دوباره حل شد. نتایج نشان دهنده حساسیت بالای سیستم نسبت به قابلیت اطمینان به کارکرد خط انتقال زرينه‌رود می‌باشد. وقوع شکست در این خط می‌تواند عملکرد سیستم را با افت شدید مواجه نماید. حل مدل با استفاده از تابع قابلیت اطمینان نشان می‌دهد تابع ارائه شده در این پژوهش قادر به ارزیابی عملکرد شبکه تأمین آب شهر تبریز و حفظ رضایت‌مندی ساکنین آن می‌باشد. برای ادامه تحقیق می‌توان تغییرات اقلیم و خشک‌سالی‌ها را به عنوان عوامل تأثیرگذار بر روند تأمین آب وارد مدل سازی نموده و اثرات آن را بررسی نمود. همچنین با رویکردهای دیگری می‌توان مسأله چندهدفه را بدون تبدیل آن به بهینه‌سازی تک‌هدفه حل نموده و دسته پاسخ‌های بهینه پارتو را در اختیار تصمیم‌گیر قرار داد، تا وی بتواند با در نظر گرفتن اولویت‌ها یک پاسخ را برگزیند.

## ۶- قدردانی

بدین‌وسیله از کارشناسان محترم شرکت آب و فاضلاب و سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی برای ارائه اطلاعات آب شهر تبریز تشکر می‌شود. همچنین از نظرات دو داور محترم نیز قدردانی به عمل می‌آید.

## ۷- مراجع

- [۱] ببران، ص.، هنربخش، ن.، "بحران وضعیت آب در جهان و ایران"، فصل‌نامه راهبرد، ۱۳۸۷، ۴۸، ۱۹۳-۲۱۲.
- [۲] حاجی‌کاظمیان، ح.، "بهینه‌سازی عرضه و تقاضای آب شهری تبریز با تأکید بر قابلیت اعتماد با استفاده از

- [۱۶] مهندسين مشاور آشناب، "طرح آبرسانی نهند، گزارشات مطالعات مرحله اول؛ جلد اول: خلاصه گزارشات توجیه اقتصادی طرح"، ۱۳۶۶.
- [۱۷] دفتر برنامه ریزی، "سیمای کلی طرح آبرسانی تبریز از زرینه رود"، شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی، ۱۳۷۲.
- [18] Keeney R. L., Raiffa, H., "Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs", Cambridge University Press, 1993.
- [13] Zeleny, M., "The Theory of the Displaced Ideal, In: M. Zeleny (ed.), 153–206. Multiple Criteria Decision Making", Kyoto 1975, Springer-Verlag, Berlin.
- [14] Zarghami, M., Hajykazemian, H., "Urban Water Resources Planning by Using a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm", Resources, Conservation and Recycling, 2012, in press, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.11.003
- [۱۵] دفتر مدیریت مصرف و کاهش آب بدون درآمد، "گزارش اقدام پایه و فرم بالانس آب"، شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی، ۱۳۸۴-۱۳۸۸.