

ارزیابی روش‌های مدل‌سازی بردار متغیر تصمیم در طراحی بهینه چندفازی شبکه‌های توزیع آب

محمد مهدی ریاحی^{۱*}، امین ابراهیم بخشی پور^۲، کارلو جودیچانی^۳، علی حقیقی^۴،
انریکو کریاکو^۵

۱- دانشکده عمران و معماری دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز- بلوار گلستان- دانشگاه شهید چمران،
mo_riyahi@yahoo.com

۲- دپارتمان مدیریت آب شهری، دانشگاه کایزرسلاترن، آلمان
amin.bakhshipour@bauing.uni-kl.de

۳- گروه مهندسی عمران و معماری، دانشگاه پاویا، ایتالیا
carlo.giudicianni@unipv.it

۴- دانشکده عمران و معماری دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز- بلوار گلستان- دانشگاه شهید چمران،
a.haghighi@scu.ac.ir

۵- گروه مهندسی عمران و معماری، دانشگاه پاویا، ایتالیا
enrico.creaco@unipv.it

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

چکیده

برخلاف روش طراحی استاتیکی که رویکردی سنتی محسوب می‌گردد و فرآیند طراحی شبکه آبرسانی را در یک مرحله به انجام می‌رساند، روش طراحی دینامیکی با تقسیم‌بندی دوره طرح به فازهای متعدد، به طراحی شبکه توزیع آب می‌پردازد. امروزه به‌منظور دستیابی به طرح‌های بهینه در روش طراحی دینامیکی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در پژوهش حاضر، ابتدا روش طراحی و ساخت چندفازی که زیرمجموعه‌ای از طراحی دینامیکی است، تشریح گردیده است. سپس، دو رویکرد متمایز مدل تجمیعی و مدل تفکیکی جهت مدل‌سازی بردار

متغیرهای تصمیم‌گیری در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه معرفی می‌گردند. مدل تجمیعی در هر فاز از یک کروموزوم واحد استفاده می‌کند، در حالی که مدل تفکیکی برای هر فاز از دو کروموزوم مجزا بهره می‌گیرد. در نهایت، تأثیراتی که این دو رویکرد مدل‌سازی بردار متغیرهای تصمیم‌گیری بر طراحی چندفازی شبکه‌های آبرسانی اعمال می‌نمایند، مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهد که مدل تفکیکی منجر به بهبود ۱۰ درصدی جواب‌های جبهه پارتوی نهایی نسبت به مدل تجمیعی گردیده است. علاوه بر این، این مدل موجب افزایش ۶ درصدی تعداد جواب‌های نهایی جبهه پارتو و افزایش ۲ برابری تعداد جواب‌های امکان‌پذیر در تکرارهای ابتدایی در مقایسه با مدل تجمیعی شده است. واژه‌های کلیدی فارسی: شبکه‌های توزیع آب، بهینه‌سازی چندهدفه، طراحی استاتیکی و دینامیکی، روش چندفازبندی.

Evaluation of decision variable vector modeling methods in multiphase optimal design of water distribution networks Abstract

Mohammad Mehdi Riyahi^{1*}, Amin E. Bakhshipour², Carlo Giudicianni³, Ali Haghghi⁴, Enrico Creaco⁵

1-Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran; mo_riyahi@yahoo.com

2-Department of Urban Water Management, University of Kaiserslautern, Paul-Ehrlich-Straße 14, Kaiserslautern D- 67663, Germany; amin.bakhshipour@bauing.uni-kl.de

3-Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università Degli Studi di Pavia, 27100 Pavia, Italy; carlo.giudicianni@unipv.it

4- Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran; a.haghghi@scu.ac.ir

5- Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università Degli Studi di Pavia, 27100 Pavia, Italy; enrico.creaco@unipv.it

Received: 12/04/2025

Revised: 22/08/2025

Accepted: 24/09/2025

Unlike the static design, a traditional method that completes the design step in one phase, the dynamic method divides the design period into various phases. Nowadays, multi-objective optimization algorithms are employed to achieve optimal designs in the dynamic method. This research explains the multiphase design and construction, a sub-method of the dynamic method.

Subsequently, two distinct approaches, namely the aggregated model and the disaggregated model, are introduced for modeling the decision variable vector in the multi-objective optimization algorithm. The aggregated model utilizes a single chromosome for each phase, while the disaggregated model employs two separate chromosomes for each phase. Finally, the effects of different approaches of decision variable vectors modelling applied to the dynamic method are investigated. The results demonstrate that the disaggregated model leads to a 10% improvement in the final Pareto front solutions compared to the aggregated model. Furthermore, this model results in a 6% increase in the number of final Pareto front solutions and a 2-fold increase in the number of feasible solutions in the initial iterations compared to the aggregated model.

Keywords: Water distribution networks, multi-objective optimization, static and dynamic design methods, multi-phase method

۱- مقدمه

عموماً برای طراحی شبکه‌های توزیع آب، دوره طرح ۲۵ ساله در نظر گرفته می‌شود و این شبکه‌ها بر اساس مصارف تخمینی در انتهای دوره طرح طراحی می‌گردند. این طراحی ممکن است به صورت سنتی و با بهره‌گیری از بهینه‌سازی تک‌هدفه، صرفاً با لحاظ نمودن هزینه به عنوان تابع هدف انجام پذیرد (Haghighi, Samani, and Samani 2011; Riyahi et al. 2024; Krapivka and Ostfeld 2009; Alperovits and Shamir 1977). یا ممکن است به صورت چندهدفه و با در نظر گرفتن هزینه و اعتمادپذیری در قالب یک مسئله تصمیم‌سازی چندمعیاره صورت گیرد که برای این منظور از الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه استفاده می‌شود (Creaco and Franchini 2012; Riyahi, Bakhshipour, and Haghighi 2023; Farmani, Walters, and Savic 2005; Farmani, Walters, and Savic 2006; Poojitha and Jothiprakash 2024) و یا در پژوهش‌های اخیر با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین طراحی شبکه‌های آبرسانی انجام شود (Bahrami Chegeni et al. 2025). پس از طراحی سنتی شبکه‌های توزیع آب و با اتمام دوره طرح، به دلایل متعددی از جمله گسترش افقی و عمودی شهر، افزایش جمعیت، تغییر در رفتار و فرهنگ اجتماعی جامعه، فرسودگی تجهیزات آبرسانی، هدررفت آب، کاهش کیفیت آب و سایر عوامل، ضرورت نوسازی و ارتقاء شبکه‌های توزیع آب ایجاد می‌گردد. یکی از مهم‌ترین جنبه‌های طراحی، نوسازی و ارتقاء شبکه‌های توزیع آب، تأمین بودجه مورد نیاز است که این بودجه به صورت تدریجی در طول زمان به پروژه تخصیص می‌یابد. بر اساس بودجه در دسترس، ممکن است ساخت، طراحی و ارتقاء شبکه توزیع آب به صورت یکپارچه انجام پذیرد و اولویت‌بندی برای این منظور صورت گیرد.

روش طراحی سنتی، چه برای طراحی شبکه آبرسانی جدید و چه برای نوسازی و ارتقاء شبکه آبرسانی موجود، بر پایه دو فرض اساسی استوار گردیده است (Creaco, Franchini, and Walski 2014). فرض نخست مبتنی بر این است که طراحی در یک مرحله و بر اساس پیک مصرف در دوره طرح صورت می‌پذیرد که اصطلاحاً طراحی استاتیکی نامیده می‌شود. فرض دوم بر این اصل استوار است که ساخت‌وساز نیز در یک مرحله انجام می‌گیرد که به آن ساخت‌وساز استاتیکی اطلاق می‌گردد. در رویکرد سنتی مفهوم ساخت و توسعه تدریجی شبکه آبرسانی که با واقعیت‌های اجرایی همخوانی بیشتری دارد، مورد توجه قرار نمی‌گیرد. در روش‌های نوین طراحی و ساخت شبکه‌های توزیع آب، تلاش بر این است که این فرضیات محدودکننده تا حد امکان مرتفع گردد. در رویکرد نوین، دوره طرح به فازهایی با سال‌های کوچک‌تر تقسیم‌بندی می‌شود و ساخت و طراحی شبکه آبرسانی به صورت مرحله‌بندی شده انجام می‌پذیرد. همچنین در این روش، طراحی بر مبنای تقاضای پیک در انتهای هر فاز صورت می‌گیرد.

از پژوهش‌های اولیه انجام شده که طراحی و ساخت و ساز شبکه‌های توزیع آب را به صورت فازبندی شده در نظر گرفته است می‌توان به Lansey et al. 1992 و Engelhardt 1999 اشاره کرد. در سالیان اخیر نیز پژوهش‌هایی با طراحی و ساخت به صورت فازبندی انجام شده است که می‌توان به مقالات زیر اشاره کرد:

Creaco, Franchini, and Walski 2014, 2015; Creaco, Franchini, and Walski 2016 .
Dell'Aira et al. 2021; Minaei, Haghghi, and Ghafouri 2019; Minaei et al. 2024

Creaco et al. (2014) به ارائه روشی نوین طراحی لوله‌های اصلی شبکه‌ی دو حلقه پرداختند. در مقاله Creaco et al. (2014) دوره‌ی طرح ۱۰۰ سال به فازهای ۲۵ سال تقسیم شدند و سپس دو روش استاتیکی و دینامیکی برای طراحی شبکه آبرسانی مقایسه شدند. مقاله Creaco et al. (2015) به بررسی عدم قطعیت دبی مصرفی در فازهای طراحی پرداخته است. در مقاله Creaco et al. (2015) برای در نظر گرفتن عدم قطعیت از تابع جرم احتمال استفاده شده است. در مقاله‌ی Creaco et al. (2016) به بررسی سه رویکرد متفاوت فازبندی پرداخته شده است. این سه رویکرد عبارت‌اند از: (۱) طراحی تک فازی با بازخورد تقاضا. (۲) طراحی چندفازی بدون بازخورد تقاضا و (۳) طراحی چندفازی با بازخورد تقاضا. در مقاله‌ی Creaco et al. (2016) بازخورد تقاضا سعی بر تصحیح کردن تقاضای پیش‌بینی شده در هر فاز با استفاده از اطلاعات به دست آمده از فازهای قبلی را دارد. (Dell'Aira et al. 2021) به بررسی طراحی و نوسازی شبکه‌ی آبرسانی پرداختند. در این مقاله از روش‌های جاگذاری لوله در مکان‌های جدید، لوله موازی و جایگزین لوله جدید با لوله فرسوده استفاده شده است. در مقاله Dell'Aira et al. (2021) از مدل سازی هیدرولیکی مبتنی بر فشار استفاده شده بود. (Minaei et al. 2019) به بررسی ارتقا شبکه‌ی توزیع آب فرسوده با استفاده از

تکنیک فازبندی پرداختند. در مقاله (Minaei et al. (2019) از سه روش متفاوت فازبندی استفاده کردند. این سه روش عبارت اند از: (۱) روش چندفازی که توسط (Creaco et al. (2014 ارائه شده بود. (۲) روش طراحی و ساخت فاز به فاز (۳) روش ساخت فاز به فاز و طراحی تک فازی. (Minaei et al. (2024 به طراحی و ساخت فازبندی شده سه زیرساخت وابسته (شبکه آب، فاضلاب و راه) پرداختند. در مقاله‌ی (Minaei et al. (2024، از الگوریتم ژنتیک تک هدفه جهت شناسایی حداقل هزینه اجرای طرح بهره گرفته شده است. نتایج حاصله مؤید این موضوع می‌باشد که طراحی و ساخت به صورت فازبندی شده می‌تواند منجر به کاهش ۲۵ درصدی در هزینه‌ها گردد.

روش طراحی و ساخت دینامیکی از جمله رویکردهای کارآمدی است که امروزه پژوهشگران برای طراحی شبکه‌های جدید و همچنین نوسازی و ارتقاء شبکه‌های فرسوده از آن بهره می‌گیرند. با توجه به نوظهور بودن این روش، در مقایسه با روش سنتی (روش استاتیکی)، مطالعات محدودتری در خصوص این رویکرد صورت پذیرفته است. علی‌رغم مطالعات انجام‌شده در حوزه طراحی دینامیک و فازبندی شبکه‌های آبرسانی، هنوز شکاف پژوهشی مهمی در زمینه مقایسه جامع رویکردهای مختلف مدل‌سازی بردار متغیرهای تصمیم وجود دارد. اگرچه پژوهش‌های پیشین به کارگیری روش‌های متنوع فازبندی و بهینه‌سازی را بررسی نموده‌اند، اما تحلیلی جامع برای مطالعه تأثیر ساختار مدل‌سازی بردار تصمیم بر عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مغفول مانده است. به طور خاص، هیچ‌یک از مطالعات قبلی به مقایسه سیستماتیک رویکرد تجمیعی (که در آن تمامی متغیرهای تصمیم در یک بردار واحد قرار می‌گیرند) و رویکرد تفکیکی (که در آن متغیرهای مربوط به روش‌های ارتقاء و قطر لوله‌ها در دو بردار مجزا مدل‌سازی می‌شوند) نپرداخته‌اند. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف، به ارزیابی جامع و مقایسه کارایی دو رویکرد یادشده در طراحی چندفازی شبکه‌های توزیع آب می‌پردازد. در پژوهش حاضر، ابتدا انواع روش‌های فازبندی برای طراحی و ساخت شبکه تشریح گردیده است. سپس دو رویکرد متمایز (تحت عناوین رویکرد تجمیعی و رویکرد تفکیکی) به منظور مدل‌سازی بردار متغیرهای تصمیم‌گیری ارائه شده است. در نهایت، به بررسی تأثیراتی که هر یک از رویکردهای مدل‌سازی بردار متغیرهای تصمیم‌گیری بر عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه در روش طراحی دینامیکی اعمال می‌نمایند، پرداخته شده است.

۲- متودولوژی

۲-۱- روش طراحی دینامیکی

برخلاف روش سنتی که در آن بازه زمانی معادل افق طرح بوده و طراحی و ساخت در یک مرحله با لحاظ نمودن تقاضای پیک در انتهای دوره طرح صورت می‌پذیرد (که اصطلاحاً طراحی استاتیکی نامیده می‌شود)، در روش نوین که مبتنی بر فازبندی دوره طرح است، دوره طرح که برابر با T است به بازه‌های کوچکتر Δt تقسیم می‌گردد (که به آن طراحی دینامیکی

نیز اطلاق می‌شود). تعداد این تقسیمات برابر با n است که نشان دهنده‌ی تعداد کل فازها می‌باشد. k به عنوان شاخص هر فاز مطرح است که در بازه ۱ تا n متغیر بوده و از سال $(k-1)\Delta t$ آغاز و به سال $k\Delta t$ ختم می‌گردد. در پژوهش حاضر، جهت ارتقاء شبکه توزیع آب از دو روش لوله موازی و جایگزین استفاده شده است. در روش لوله موازی، لوله جدید در مسیر موازی با لوله موجود نصب می‌گردد و جریان آب به صورت همزمان در هر دو لوله (جدید و موجود) برقرار می‌باشد. در مقابل، در روش جایگزینی، لوله جدید به منظور جایگزینی لوله موجود نصب شده و لوله قدیمی از مدار خارج می‌گردد، به گونه‌ای که جریان آب تنها از طریق لوله جدید انجام می‌پذیرد. تعداد لوله‌های موجود در شبکه قبل از سال صفر برابر با n_{p0} می‌باشد و تعداد لوله‌هایی که در فاز اول در بخش‌های جدید شبکه اجرا می‌شود برابر با $n_{p1,k=1}$ و تعداد لوله‌هایی که در فاز اول به صورت موازی در شبکه اجرا می‌شوند برابر با $n_{p2,k=1}$ است. در نتیجه، می‌توان تعداد کل لوله‌ها در انتهای سال Δt که مقارن با ابتدای فاز دوم است ($N_{p,k=1}$)، را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$N_{p,k=1} = n_{p0} + n_{p1,k=1} + n_{p2,k=1} \quad (1)$$

به همین ترتیب می‌توان تعداد کل لوله‌های موجود در فاز k ام را به صورت زیر محاسبه نمود.

$$N_{p,k} = n_{p0} + \sum_{k=1}^n n_{p1,k} + \sum_{k=1}^n n_{p2,k} \quad (2)$$

در رابطه‌ی فوق، $n_{p1,k}$ نشان دهنده تعداد لوله‌هایی است که در فاز k ام در مناطق جدید اجرا می‌گردند و $n_{p2,k}$ بیانگر تعداد لوله‌هایی است که در فاز k ام به صورت موازی نصب می‌شوند. همچنین، تعداد لوله‌های شبکه بدون احتساب لوله‌های موازی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود.

$$n_{p,k} = n_{p0} + \sum_{k=1}^n n_{p1,k} \quad (3)$$

لازم به ذکر است که از آنجا که لوله‌های جایگزین به جای لوله‌های موجود نصب می‌گردند، تغییری در تعداد کل لوله‌های شبکه ایجاد نمی‌نمایند؛ در نتیجه، تعداد آن‌ها در محاسبه تعداد کل لوله‌های شبکه منظور نمی‌گردد. حداکثر تعداد لوله‌های موازی که قابلیت اجرا دارند، در فاز اول برابر با n_{p0} ، در فاز دوم برابر با $n_{p0} + n_{p1,1}$ و در فاز k ام برابر با $n_{p0} + \sum_{i=1}^{k-1} n_{p1,i}$ می‌باشند.

روش‌های فازبندی ساخت و طراحی را می‌توان به سه صورت طبقه‌بندی نمود (Minaei et al., 2019): (۱) طراحی و ساخت چندفازی، (۲) طراحی و ساخت فاز به فاز، و (۳) ساخت و ساز فاز به فاز همراه با طراحی تک‌فازی. در پژوهش حاضر، از روش طراحی و ساخت چندفازی، با بهره‌گیری از دو رویکرد متمایز در مدل‌سازی بردار متغیر تصمیم استفاده شده

است. دلیل استفاده از روش طراحی و ساخت چندفازی، کارایی و قابلیت اجرایی این روش نسب به سایر روش‌ها است که در مقالات Creaco et al., 2014 و Minaei et al., 2019 به آن اشاره شده است. این دو رویکرد بر مبنای چگونگی مدل‌سازی بردار متغیرهای تصمیم در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی دینامیکی استوار می‌باشند که در ادامه این بخش، جزئیات هر رویکرد به تفصیل تشریح خواهد گردید.

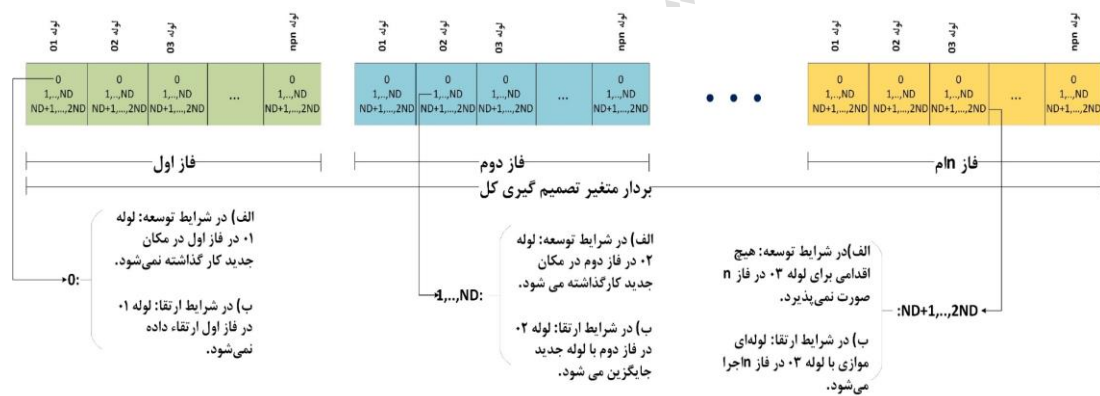
۲-۲- رویکرد تجمیعی در مدل‌سازی بردار متغیرهای تصمیم‌گیری

این رویکرد که جهت مدل‌سازی بردار متغیرهای تصمیم‌گیری در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه دینامیکی کاربرد دارد، در پژوهش‌هایی نظیر Minaei et al. (2019) ارائه گردیده است. در این رویکرد، روش‌های ارتقاء از قبیل جایگزینی لوله، نصب لوله موازی، طراحی بخش‌های جدید شبکه و یا عدم ارتقاء لوله فرسوده، همگی در قالب یک متغیر تصمیم واحد مدل‌سازی می‌شوند. این فرآیند بدین صورت محقق می‌گردد که در یک متغیر تصمیم‌گیری برای یک لوله مشخص، امکان انتخاب قطر جدید برای توسعه در مناطق جدید، امکان انتخاب قطر مناسب برای ایجاد لوله موازی، امکان انتخاب قطر لوله جدید برای حالت جایگزین و یا گزینه عدم تغییر لوله فرسوده فراهم می‌گردد.

برای این منظور، ابتدا باید تعداد کل متغیرهای تصمیم‌گیری که برابر با تعداد لوله‌های شبکه در تمامی فازها است، محاسبه گردد. از طریق رابطه‌ی (۳) می‌توان تعداد کل این لوله‌ها را محاسبه نمود. با توجه به اینکه در روش طراحی و ساخت چندفازی، تمامی فازها به‌طور همزمان وارد الگوریتم بهینه‌سازی می‌شوند، در نتیجه بردار متغیر تصمیم‌گیری کل مشتمل بر تمامی متغیرهای تصمیم‌گیری برای کلیه‌ی فازها می‌باشد. با توجه به این موضوع که تعداد کل لوله‌های شبکه (بدون احتساب لوله‌های موازی) برابر با $n_{p,n}$ لوله است، برای تعریف بردار متغیرهای تصمیم‌گیری که تمامی فازها را پوشش دهد، لازم است در هر فاز تعداد $n_{p,n}$ متغیر تصمیم در نظر گرفته شود. بنابراین، اگر تعداد کل فازها برابر با k باشد، تعداد کل متغیرهای تصمیم‌گیری برابر با $k * n_{p,n}$ خواهد بود که در شکل (۱) نیز قابل مشاهده است. به طور مشخص، متغیرهای تصمیم‌گیری مربوط به هر فاز به صورت دسته‌هایی تعریف میشوند به این صورت که متغیرهای شماره ۱ تا $n_{p,n}$ مربوط به فاز اول، متغیرهای شماره $n_{p,n} + 1$ تا $2 * n_{p,n}$ مربوط به فاز دوم، و به همین ترتیب متغیرهای شماره $(k - 1) * n_{p,n} + 1$ تا $k * n_{p,n}$ به فاز k اختصاص دارند. درواقع مقدار $(k - 1) * n_{p,n} + 1$ شماره شروع متغیرهای مرتبط با فاز k و مقدار $(k - 1) * n_{p,n} + 1$ ، شماره پایانی متغیرهای مرتبط با فاز k می‌باشند.

هر متغیر تصمیم می‌تواند مقادیری بین 0 تا $2 * N_D$ را اختیار نماید. N_D معرف تعداد لوله‌های تجاری در دسترس است. اگر در فاز k ، تعدادی از لوله‌های شبکه در این فاز وجود ندارند (به عنوان مثال ممکن است لوله‌های مورد نظر اصلاً در

این فاز اجرا نشده اند)، مقدار متغیر تصمیم که برای این لوله‌ها در نظر گرفته می‌شود برابر با مقدار O می‌باشد. همچنین اگر لوله‌ی مورد نظر در این فاز موجود باشد اما بر اساس محاسبات هیدرولیکی می‌بایست بدون تغییر باقی بماند، نیز می‌تواند مقدار O را اتخاذ نماید. حال چنانچه در فاز k ، یک لوله می‌بایست در یک منطقه‌ی جدید ایجاد گردد، مقادیری بین ۱ تا N_D را اختیار می‌نماید و اگر لوله‌ی مورد نظر در وضعیت ارتقاء باشد، برای جایگزینی لوله جدید با لوله فرسوده نیز مقادیری بین ۱ تا N_D را می‌تواند اختیار نماید. بدیهی است که یک لوله یا می‌تواند در وضعیت توسعه باشد، یعنی اینکه در یک منطقه‌ی جدید اجرا شود و یا اینکه در وضعیت ارتقاء باشد و وقوع هر دو حالت به صورت هم‌زمان امکان‌پذیر نمی‌باشد. حال چنانچه مدل محاسباتی قصد داشته باشد برای یک لوله فرسوده که در وضعیت ارتقاء است، یک لوله‌ی موازی تعبیه نماید، می‌تواند مقادیر بین $N_D + 1$ تا $2 * N_D$ را انتخاب نماید. در شکل (۱)، نمودار گرافیکی این روش همراه با خلاصه توضیحات ارائه گردیده است.



شکل (۱) نمودار رویکرد اول مدل سازی متغیر تصمیم گیری برای روش طراحی و ساخت چندفازی

۲-۳- رویکرد تفکیکی به منظور مدل سازی بردار متغیرهای تصمیم گیری

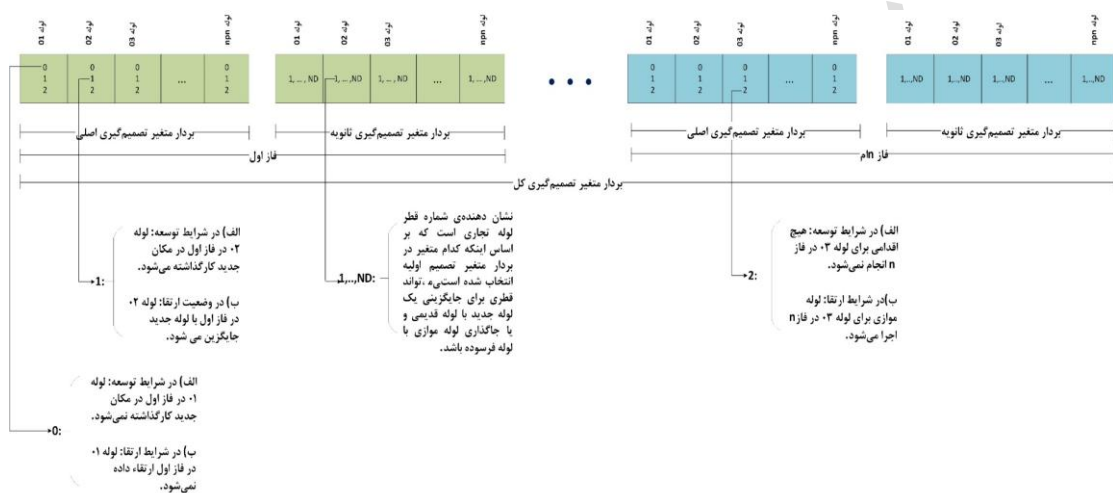
رویکرد دوم جهت مدل‌سازی بردار متغیرهای تصمیم‌گیری، در پژوهش‌هایی نظیر Raziye Farmani et al. (2005) و Raziye Farmani et al. (2006) مورد استفاده قرار گرفته است. در این رویکرد، ابتدا برای هر لوله در متغیر تصمیم‌گیری، نوع فرآیند مورد نظر شامل نوسازی، ارتقاء، طراحی و یا عدم تغییر انتخاب می‌گردد و سپس در متغیر دیگر که مرتبط با همان لوله است، شماره قطر لوله تجاری تعیین می‌شود. بر این اساس، در این روش طول بردار متغیر تصمیم‌گیری دو برابر بردار متغیر تصمیم‌گیری روش اول می‌باشد. بردار متغیر تصمیم‌گیری اول (که بردار متغیر تصمیم‌گیری اصلی نامیده می‌شود) جهت انتخاب نوع فرآیند و بردار متغیر تصمیم‌گیری دوم (که بردار متغیر تصمیم‌گیری ثانویه نامیده می‌شود) برای انتخاب شماره لوله در نظر گرفته می‌شود و مجموع این دو بردار، بردار متغیر تصمیم‌گیری

گیری کل نامیده می‌شود. در ادامه، این رویکرد مدل‌سازی بردار متغیر تصمیم‌گیری در سه روش فزاینده و نهایتاً برای روش سنتی تشریح می‌گردد. همان‌گونه که قبلاً نیز بیان گردید، در روش طراحی دینامیکی چندفازی، تمامی فازها به‌طور همزمان بهینه‌سازی می‌شوند. در این روش، تعداد بردارهای تصمیم‌گیری اصلی و ثانویه برابر با تعداد فازها می‌باشد که در مجموع بردار تصمیم‌گیری کل را تشکیل می‌دهند. همان‌طور که از شکل (۲) قابل استنباط است، هر بردار تصمیم‌گیری اصلی و ثانویه در هر فاز مشتمل بر تعداد $n_{p,n}$ متغیر تصمیم‌گیری است. متغیرهای تصمیم‌گیری ۱ تا $2 * n_{p,n}$ مربوط به فاز اول است که متغیر تصمیم‌گیری ۱ تا $n_{p,n}$ برای بردار تصمیم‌گیری اصلی و متغیر تصمیم‌گیری $1 + n_{p,n}$ تا $2 * n_{p,n}$ برای بردار تصمیم‌گیری ثانویه در نظر گرفته می‌شود. به همین ترتیب، متغیرهای تصمیم‌گیری $1 + n_{p,n}$ تا $2 * n_{p,n}$ برای فاز دوم و برای فاز k ام، متغیرهای تصمیم‌گیری $1 + (k - 1) * n_{p,n}$ تا $k * n_{p,n}$ اختصاص می‌یابد و به همان روشی که متغیرهای تصمیم‌گیری برای بردار اصلی و ثانویه مربوط به فاز اول تعیین گردیدند، برای سایر فازها نیز می‌توان بردار اصلی و ثانویه را محاسبه نمود. در مجموع، از متغیر ۱ تا $2 * n * n_{p,n}$ به عنوان بردار تصمیم‌گیری کل اطلاق می‌گردد. متغیرهای تصمیم‌گیری اصلی، مقادیر صحیح بین ۰ تا ۲ را اختیار می‌نمایند که هر یک بیانگر یکی از حالات ذیل می‌باشند.

- مقدار ۰: این مقدار بیانگر آن است که در وضعیت توسعه، در این موقعیت و در این فاز، لوله جدیدی اجرا نمی‌گردد و در خصوص وضعیت ارتقاء، نشان‌دهنده آن است که در این موقعیت و در این فاز، لوله قدیمی بدون اعمال تغییرات باقی می‌ماند.
- مقدار ۱: این مقدار اشاره به این موضوع دارد که در وضعیت توسعه، در این موقعیت و در این فاز، لوله جدیدی ایجاد خواهد شد که نوع و قطر لوله مورد نظر در بردار تصمیم‌گیری ثانویه تعیین خواهد گردید. در وضعیت ارتقاء، این مقدار بیان می‌دارد که لوله فرسوده در این موقعیت و در این فاز با لوله جدیدی جایگزین می‌گردد. مشابه وضعیت توسعه، بردار متغیر تصمیم‌گیری ثانویه مشخص می‌نماید که چه نوع لوله‌ای و با چه قطری در این موقعیت جایگزین لوله قدیمی می‌شود.
- مقدار ۲: این مقدار نشان‌دهنده آن است که برای وضعیت ارتقاء، روش لوله موازی انتخاب گردیده است. این مقدار صرفاً در وضعیت ارتقاء معنادار بوده و در وضعیت توسعه قابل کاربرد نمی‌باشد. همانند مورد پیشین، جهت تعیین نوع و قطر لوله از بردار متغیر تصمیم‌گیری ثانویه استفاده می‌گردد.

متغیرهای موجود در بردار متغیر تصمیم‌گیری ثانویه، مقادیر صحیح بین ۱ تا N_D را اختیار می‌نمایند که N_D نشان‌دهنده‌ی شماره قطرهای تجاری در دسترس است که از قطر کوچک به بزرگ مرتب گردیده‌اند. این قطرها صرفاً

زمانی در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرند که بردار متغیر تصمیم‌گیری اصلی شرایط استفاده از آن‌ها را فراهم نموده باشد. به عنوان مثال، چنانچه برای لوله چهارم در بردار متغیر تصمیم‌گیری اصلی مقدار ۰ انتخاب شده باشد که در وضعیت ارتقاء به معنای باقی ماندن لوله بدون تغییر است، لیکن در بردار متغیر تصمیم‌گیری ثانویه برای لوله‌ی چهارم، قطر ۳ تعیین گردیده باشد، این قطر جایگزین لوله قدیمی نمی‌گردد، زیرا در بردار متغیر تصمیم‌گیری اولیه اجازه‌ی این عملیات صادر نگردیده است. در شکل (۲)، نمودار گرافیکی این روش به همراه خلاصه توضیحات ارائه گردیده است.



شکل (۲) نمودار روش دوم مدل سازی متغیر تصمیم‌گیری برای روش طراحی و ساخت چندفازی

۲-۴- فرمول‌بندی مسئله طراحی دینامیکی

جهت انجام عملیات طراحی و ارتقاء شبکه‌های آبرسانی، از مدل شبیه‌ساز-بهینه‌سازی استفاده می‌گردد. برای شبیه‌سازی شبکه‌های آبرسانی، نرم‌افزار EPANET مورد استفاده قرار گرفته است. دلیل استفاده از نرم‌افزار EPANET، قابلیت مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی و تحلیل دقیق عملکرد آن‌ها با استفاده از این نرم‌افزار می‌باشد. همچنین در این پژوهش به منظور به دست آوردن جواب‌های بهینه برای ارتقاء شبکه‌ی آبرسانی از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II استفاده شده است که در قسمت ۳-۴ به معرفی آن پرداخته شده است. در حقیقت، نرم‌افزار EPANET و الگوریتم NSGA-II با یکدیگر پیوند یافته و مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز یکپارچه‌ای را تشکیل می‌دهند. در این مدل، الگوریتم NSGA-II راه‌حل‌های بهینه برای ارتقای شبکه آبرسانی تولید می‌نماید و نرم‌افزار EPANET مسئولیت شبیه‌سازی هیدرولیکی این راه‌حل‌ها را بر عهده دارد. هدف نخست در الگوریتم NSGA-II، کمینه‌سازی هزینه و هدف دوم، بیشینه‌سازی اعتمادپذیری می‌باشد. اعتمادپذیری مورد استفاده در این پژوهش، بر اساس معیار اعتمادپذیری معرفی شده در مطالعه Minae et al. (2019) استوار است که به دو دسته اعتمادپذیری در شرایط کم‌توان و شرایط پرتوان

تقسیم‌بندی می‌گردد. شرایط کم‌توان به حالتی اطلاق می‌گردد که در آن، حداقل در یکی از گره‌های شبکه، فشار موجود از حد مطلوب کمتر باشد. در صورتی که فشار در تمامی گره‌های شبکه از حداقل فشار مورد نیاز بیشتر باشد، چنین شبکه‌ای را شبکه پرتوان نامیده و شرایط حاکم بر آن را شرایط پرتوان می‌نامند (Minaei et al. 2019). هزینه‌های طراحی و نوسازی شبکه مشتمل بر موارد ذیل است: ۱- اجرای لوله‌ی جدید در مناطق توسعه‌یافته ۲- جایگزینی لوله جدید با لوله‌های فرسوده ۳- اجرای لوله‌ی موازی در مجاورت لوله‌های فرسوده. بر این اساس، محاسبه‌ی هزینه در فاز k به صورت زیر انجام می‌پذیرد (Creaco et al., 2014):

$$Cost_k = \sum_{i=1}^{n_{1,k}} c_i l_i + \sum_{j=1}^{n_{2,k}} c_j l_j + \sum_{z=1}^{n_{3,k}} c_z l_z \quad (4)$$

$Cost_k$ هزینه در فاز k ام و مقادیر $n_{1,k}$ ، $n_{2,k}$ و $n_{3,k}$ به ترتیب معادل تعداد لوله‌های جدیدی که در مناطق توسعه‌یافته اجرا می‌گردند، تعداد لوله‌های جدیدی که به صورت موازی با لوله‌ی قدیمی اجرا می‌شوند و تعداد لوله‌های جدیدی که جایگزین لوله‌های قدیمی در فاز k می‌گردند، می‌باشند. c_i ، c_j و c_z به ترتیب نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی واحد طول لوله جدید، لوله‌ی موازی و لوله جایگزین می‌باشند. ذکر این نکته ضروری است که به دلیل پیچیدگی اجرای لوله موازی، هزینه‌ی واحد طول این نوع اجرا، ۱۰ درصد بیشتر از اجرای لوله جدید یا جایگزین می‌باشد. پس از محاسبه‌ی هزینه طراحی و ارتقاء برای هر فاز، می‌توان هزینه‌ی فعلی را برای تمامی فازها محاسبه نموده و با یکدیگر جمع نمود (Minaei et al. 2019).

$$Cost = \sum_{k=1}^n \frac{Cost_k}{(1+R)^{(k-1)\Delta t}} \quad (5)$$

در معادله‌ی بالا R برابر با اختلاف نرخ سود و تورم است.

محاسبه‌ی اعتمادپذیری برای دو حالت در شرایط کم‌توان و شرایط پرتوان انجام می‌پذیرد. همچنین برای هر دو حالت کم‌توان و پرتوان، اعتمادپذیری به گونه‌ای محاسبه می‌گردد که میانگین اعتمادپذیری از فاز k تا انتهای فاز n را در بر گیرد. برای شرایط کم‌توان، می‌توان اعتمادپذیری را به صورت ذیل محاسبه نمود (Minaei et al. 2019).

$$Re_{1k} = 1 - \frac{\sum_{i=k}^n \sum_{j=1}^{n_n} \max(0, -\text{sign}(H_{ij} - H_{des}))}{n_n(n-k+1)} \quad (6)$$

در معادله‌ی فوق، H_{ij} و H_{des} به ترتیب نشان‌دهنده‌ی هد در نقطه‌ی j در فاز i و هد مطلوب شبکه می‌باشند. n_n بیانگر تعداد کل گره‌های موجود در شبکه است. مقدار Re_{1k} بین ۰ و ۱ می‌باشد و در حالتی که معادل ۱ باشد، شبکه در وضعیت پرتوان قرار دارد. در این صورت، از معادله‌ی ذیل استفاده می‌گردد (Minaei et al. 2019).

$$Re_{2k} = \frac{\sum_{i=k}^n \left(\frac{\sum_{j=1}^n C_{i,j} * q_{i,j} (H_{ij} - H_{des})}{\left[\sum_{l=1}^{nr_i} Qr_{i,l} * Hr_{i,l} + \sum_{m=1}^{pn_i} \left(\frac{P_{i,m}}{\gamma} \right) \right] - \sum_{j=1}^n q_{i,j} H_{des}} \right)}{(n - k + 1)} \quad (7)$$

$$C_{i,j} = \frac{\sum_{r=1}^{np_{i,j}} D_r}{np_{i,j} * \max\{D_r\}} \quad (8)$$

در معادله‌ی فوق، $q_{i,j}$ و $C_{i,j}$ به ترتیب معادل تقاضا و ضریب وزن دار (که نشان‌دهنده‌ی یکنواختگی لوله‌های متصل به گره j است) برای گره j در فاز i می‌باشند. nr_i ، $Qr_{i,l}$ و $Hr_{i,l}$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تعداد مخازن، دبی خروجی و هد مخزن l در فاز i می‌باشند. pn_i ، $P_{i,m}$ و γ به ترتیب بیانگر تعداد پمپ، توان پمپ m و وزن مخصوص آب در فاز i است. $np_{i,j}$ و D_r نشان‌دهنده‌ی تعداد لوله‌های متصل به گره j و قطر هر یک در فاز i می‌باشند.

همان‌گونه که بیان گردید، چنانچه شبکه در وضعیت کم‌توان قرار داشته باشد، از رابطه‌ی Re_{1k} استفاده می‌گردد و در صورتی که شبکه دارای توان مازاد باشد، از رابطه‌ی Re_{2k} بهره گرفته می‌شود. می‌توان اعتمادپذیری کل را با ترکیب این دو شاخص به صورت ذیل محاسبه نمود.

$$R_{ek} = \begin{cases} R_{e1k} & R_{e1k} < 1 \\ R_{e1k} + R_{e2k} & R_{e1k} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

مسئله‌ی بهینه‌سازی در این روش و قیود مرتبط را به صورت زیر است:

$$\text{Minimize}(\text{Cost}, \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n -R_{ek}) \quad (10)$$

قیود این مسئله برابر با:

$$H_{ik} > H_{min}, i = 1:n, k = 1:n \quad (11)$$

$$\begin{cases} \text{رویکرد تجمیعی:} & D_{ik} \in \{0: 2 * N_D\}, i = 1:n_{pn}, k = 1:n \\ \text{رویکرد تفکیکی:} & D_{ik} \in \{0,1,2\}, i = 1:n_{pn}, k = 1:n; \\ & D'_{ik} \in \{1: N_D\}, i = 1:n_{pn}, k = 1:n \end{cases} \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^n NP_{new,ik} \leq 1 \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^n NP_{parallel,ik} \leq 1 \quad (14)$$

در معادله ۱۰، H_{min} بیانگر حداقل هد در شبکه می‌باشد که پایین‌تر از آن، تقاضای گره‌ای تأمین نمی‌گردد. همچنین در معادله ۱۱، مقدار D_{ik} در رویکرد تجمیعی نشان‌دهنده‌ی مقادیری است که متغیر تصمیم می‌تواند اختیار نماید که از ۰ تا ۲ برابر تعداد قطرهای تجاری می‌باشد. مقدار D_{ik} در رویکرد دوم، نشان‌دهنده‌ی مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری در بردار تصمیم‌گیری اصلی می‌باشد و این در حالی است که مقدار D'_{ik} مبین متغیرهای تصمیم‌گیری در بردار تصمیم‌گیری ثانویه می‌باشد. مقادیر $NP_{parallel,ik}$ و $NP_{new,ik}$ در معادلات ۱۲ و ۱۳ به ترتیب معادل تعداد لوله‌های جایگزین و

موازی برای لوله‌ی i در فاز k می‌باشند که مجموع آن‌ها برای هر لوله برابر با ۱ است که این امر بیانگر آن است که برای هر لوله در تمامی فازها، صرفاً یک لوله جایگزین و یک لوله موازی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۲-۵- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II

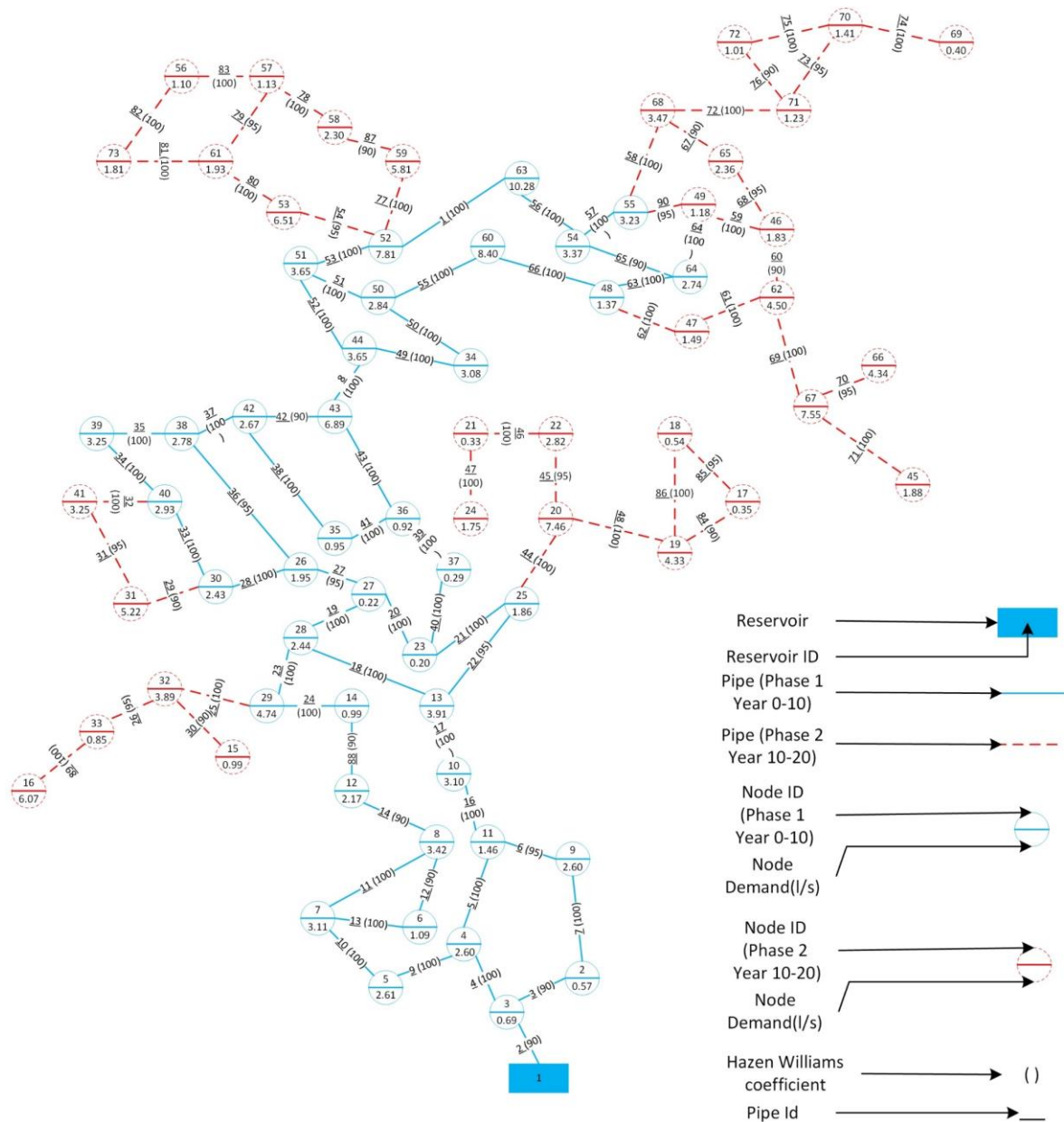
در این پژوهش، فرآیند بهینه‌سازی برای به دست آوردن طرح‌های ارتقاء با استفاده از الگوریتم NSGA-II انجام می‌پذیرد. این الگوریتم، نسخه توسعه یافته الگوریتم NSGA می‌باشد که توسط دب و همکاران در سال ۲۰۰۲ معرفی گردیده است (Deb et al. 2002). الگوریتم NSGA-II یکی از پرکاربردترین و کارآمدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه محسوب می‌شود که بر پایه الگوریتم ژنتیک استوار است و قابلیت تولید مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه (جبهه پارتو) را دارا می‌باشد. مزایای اصلی این الگوریتم عبارتند از: استفاده از رویکرد رتبه‌بندی سریع غیرمغلوب، اعمال معیار فاصله ازدحامی برای حفظ تنوع راه‌حل‌ها، و عدم نیاز به تعریف پارامترهای وزن‌دهی برای اهداف مختلف. گام‌های اجرایی الگوریتم ژنتیک NSGA-II به شرح ذیل می‌باشد (Deb et al. 2002):

- ۱- تنظیم پارامترهای الگوریتم نظیر اندازه جمعیت اولیه، تعداد نسل‌ها، نرخ جهش و تقاطع
 - ۲- تولید جمعیت اولیه به صورت تصادفی براساس محدوده مجاز متغیرهای تصمیم
 - ۳- ارزیابی توابع هدف برای کلیه اعضای جمعیت
 - ۴- محاسبه میزان تخطی هر عضو از قیود مسئله
 - ۵- رتبه‌بندی جمعیت براساس رویکرد رتبه‌بندی سریع غیرمغلوب
 - ۶- محاسبه معیار فاصله ازدحامی برای تمامی اعضای جمعیت
 - ۷- انتخاب والدین بر اساس عملگر انتخاب مسابقه
 - ۸- تولید نسل فرزندان از طریق عملگر تقاطع
 - ۹- اعمال عملگر جهش بر روی فرزندان تولید شده
 - ۱۰- انتخاب جمعیت نسل بعدی براساس رتبه‌بندی غیرمغلوب و فاصله ازدحامی
 - ۱۱- در صورت عدم برقراری شرایط خاتمه، الگوریتم به گام سوم بازگشته و محاسبات تکرار می‌گردد
- این فرآیند تا رسیدن به حداکثر تعداد نسل‌ها یا تحقق سایر معیارهای توقف ادامه می‌یابد.

۳- شبکه مورد مطالعه

شبکه‌ی مورد استفاده در این پژوهش، شبکه‌ی آبرسانی شهر باغملک می‌باشد. شهر باغملک مرکز شهرستان باغملک است که در ناحیه‌ی غربی استان خوزستان واقع گردیده است و جمعیتی معادل ۴۹۵۴۷ نفر را دارا می‌باشد. شبکه‌ی

باغملک مشتمل بر ۹۰ لوله، ۷۲ گره، ۱۸ حلقه و یک مخزن در تراز ارتفاعی ۷۵۰ متر می‌باشد. شکل (۳) نمایی از شبکه‌ی جدید باغملک را ارائه نموده است. شبکه‌ی جدید باغملک، شبکه‌ای است که سابقاً موجود نبوده است و بخشی از لوله‌ها در فاز اول و بخش دیگر در فاز دوم اجرا خواهند گردید.



شکل (۳) پیکربندی شبکه جدید باغملک

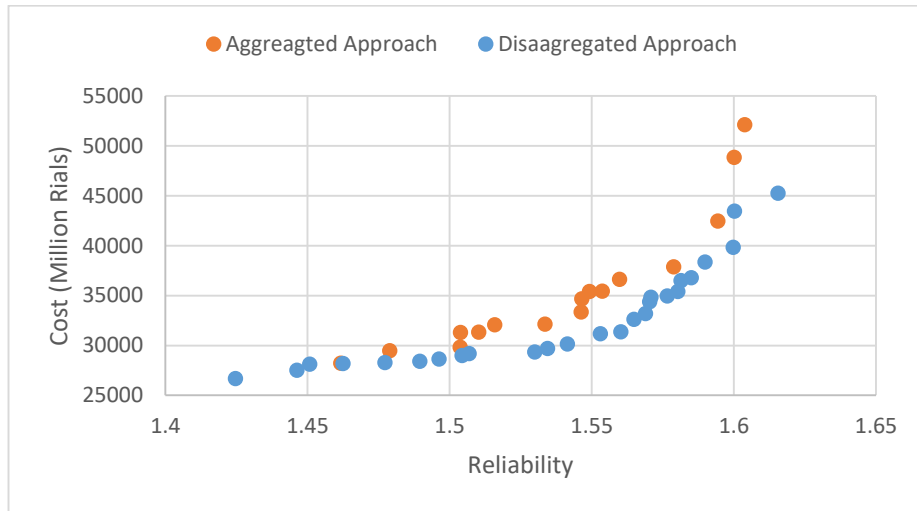
۴- نتایج

در این بخش، برای طراحی و ساخت چندفازی، از شبکه‌ی جدیدی که سابقاً موجود نبوده است، استفاده گردیده است. پیکربندی شبکه‌ی در حال توسعه‌ی باغملک در شکل (۳) نمایش داده شده است. به منظور مقایسه و بررسی نتایج روش

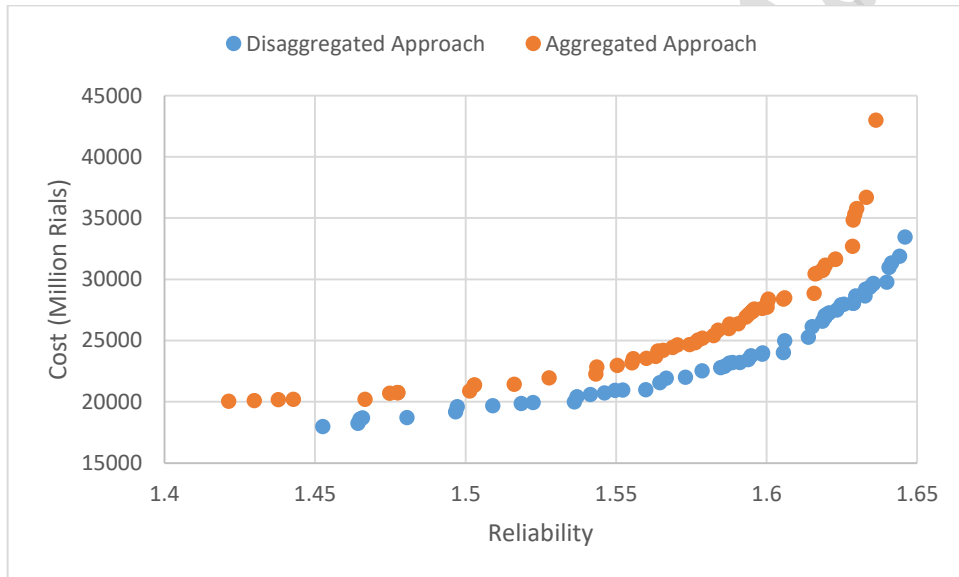
طراحی و ساخت چندفازی با استفاده از رویکرد تجمیعی و تفکیکی، از بهینه‌سازی چندهدفه NSGA-II با مشخصات ذیل بهره گرفته شده است: تعداد تکرارها ۴۰۰ تکرار، تعداد جمعیت اولیه ۳۶۰، درصد ترکیب ۹۴ درصد و درصد جهش ۶ درصد. برای انتخاب مشخصات بهینه الگوریتم بهینه‌ساز از روش سعی و خطا استفاده گردیده است تا مطلوب‌ترین مقادیر برای هر یک از پارامترها حاصل آید. دلیل اصلی انتخاب ۴۰۰ تکرار برای هر دو روش این است که پس از آزمایش تکرارهای مختلف و مقایسه نتایج خروجی با یکدیگر برای هر دو روش، مشخص گردید که عملاً پس از تکرار ۴۰۰، میزان بهبود نتایج به شدت کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، بهینه‌ترین میزان تکرار برابر با ۴۰۰ تکرار می‌باشد که می‌توان اظهار داشت پس از این مقدار، به همگرایی نسبی دست یافته شده است. در جدول (۱)، مشخصات اجرای بهینه‌سازی چندهدفه برای هر دو رویکرد ارائه گردیده و در شکل (۴)، نتایج جبهه پارتو هر دو رویکرد در تکرارهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که ذکر گردید، تعداد کل تکرارها برابر با ۴۰۰ تکرار می‌باشد، اما به منظور بررسی تفصیلی‌تر میزان پیشرفت دو روش در طول ۴۰۰ تکرار، نتایج جبهه پارتو برای هر دو روش در شکل (۴) پس از ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ تکرار مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. ذکر این نکته الزامی است که جبهه پارتو مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرمغلوب در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد که هیچ‌یک از این راه‌حل‌ها نسبت به سایر راه‌حل‌های موجود در این مجموعه، از لحاظ تمامی اهداف برتر نیستند.

جدول (۱) مشخصات اجرای الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه در طراحی شبکه آبرسانی در حال توسعه باغملک برای دو رویکرد تجمیعی و تفکیکی

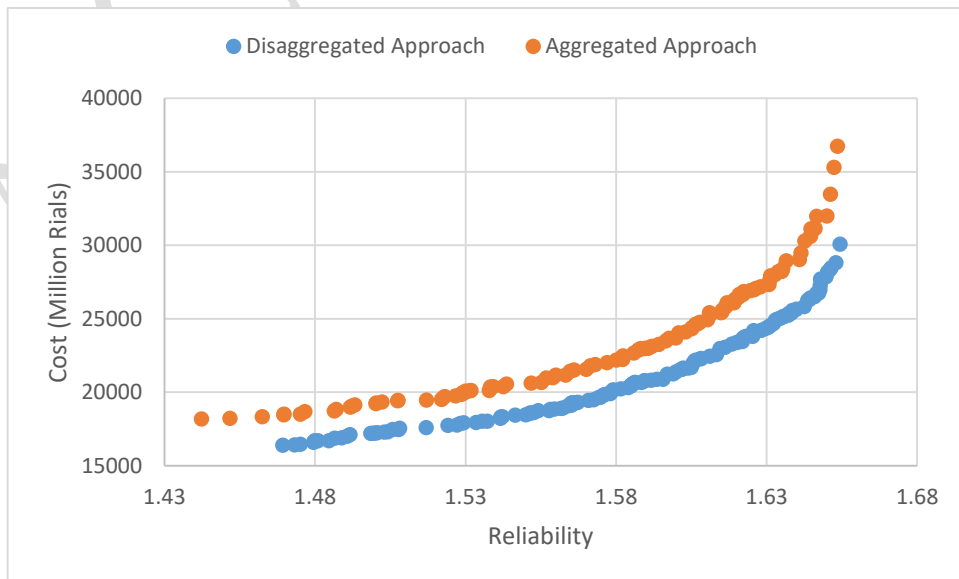
زمان لازم برای هر اجرا (ثانیه)	تعداد تکرارها در هر اجرا	تعداد ارزیابی تابع هدف در هر اجرا	تعداد جوابهای امکان پذیر موجود در جبهه پارتو در تکرار اول	اولین تکراری دارای جواب امکان پذیر	تعداد جوابهای امکان پذیر در اولین تکراری که دارای جواب امکان پذیر است	تعداد جوابهای امکان پذیر موجود در جبهه پارتو در تکرار آخر
۵۷,۶۷	۴۰۰	۱۴۴۳۶۰	۰	۷	۱	۲۰۰
۶۰,۹۸	۴۰۰	۱۴۴۳۶۰	۰	۵	۲	۳۲۴



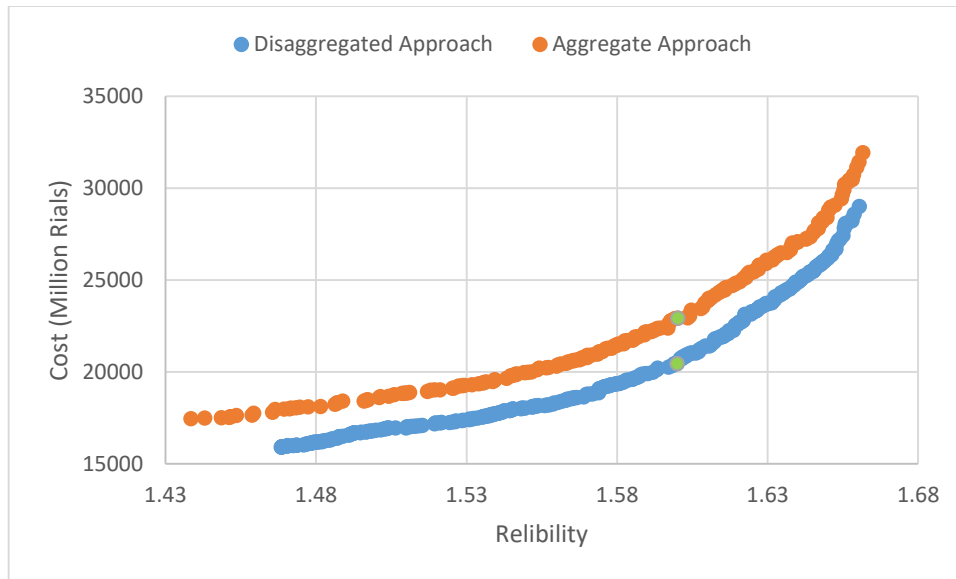
آ) مقایسه دو رویکرد در تکرار ۱۰۰



ب) مقایسه دو رویکرد در تکرار ۲۰۰



پ) مقایسه دو رویکرد در تکرار ۳۰۰



ت) مقایسه دو رویکرد در تکرار ۴۰۰

شکل (۴) مقایسه ی خروجی های بهینه سازی چندهدفه در طراحی شبکه آبرسانی جدید باغملک برای رویکرد تجمیعی و تفکیکی در تکرارهای (آ) ۱۰۰ (ب) ۲۰۰ (پ) ۳۰۰ (ت) ۴۰۰

با استناد به جدول (۱) که مشخصات اجرای رویکردهای تجمیعی و تفکیکی را ارائه می نماید، مشخص می گردد که زمان مورد نیاز برای هر تکرار در رویکرد تجمیعی تقریباً ۳ ثانیه کمتر از زمان اجرای رویکرد دوم می باشد. در مجموع ۴۰۰ تکرار، رویکرد اول حدوداً ۲۰ دقیقه صرفه جویی زمانی برای دستیابی به جبهه پارتو نشان می دهد. علت این امر می تواند به طول کمتر بردار متغیر تصمیم در رویکرد تجمیعی نسبت داده شود که نصف طول بردار در رویکرد تفکیکی است. مدت زمان لازم برای حل کامل مسئله بهینه سازی توسط الگوریتم بهینه ساز، یک معیار مهم در مسائل بزرگ مقیاس و پیچیده ای همچون طراحی شبکه های آبرسانی اهمیت ویژه ای دارد. در پروژه های عملی، تصمیم گیرندگان عموماً نیازمند دریافت نتایج در بازه زمانی محدود می باشند. کاهش زمان اجرای الگوریتم، امکان تحلیل سناریوهای متنوع در زمان کوتاه تر را فراهم نموده و قابلیت مقایسه کارایی محاسباتی الگوریتم های مختلف را میسر می سازد. همچنین در شرایطی که نیاز به تحلیل های تکراری و بررسی حساسیت پارامترها وجود دارد، زمان اجرای کمتر اهمیت بیشتری خواهد یافت. با این حال، باید توجه داشت که اگرچه زمان اجرای الگوریتم معیار مهمی محسوب می شود، اما مهم تر از آن، مقادیر توابع هدف و کیفیت راه حل های به دست آمده می باشد که مبنای اصلی تصمیم گیری برای انتخاب روش کارتر را در این پژوهش تشکیل می دهند.

لازم به ذکر است هیچ یک از رویکردها در تکرار نخست دارای پاسخ امکان پذیر نمی باشند. رویکرد تجمیعی پس از ۵ تکرار به یک پاسخ امکان پذیر دست می یابد، در حالی که رویکرد تفکیکی پس از ۷ تکرار، دو پاسخ امکان پذیر را ارائه می نماید.

علاوه بر این، تعداد جمعیت امکان‌پذیر پس از ۴۰۰ تکرار برای رویکرد تجمیعی ۲۰۰ مورد می‌باشد که معادل ۵۶ درصد از کل جمعیت است، در صورتی که تعداد جمعیت امکان‌پذیر برای رویکرد تفکیکی به ۳۲۴ مورد می‌رسد که این میزان تقریباً ۳۵ درصد بیشتر از رویکرد تجمیعی بوده و در حدود ۹۰ درصد از کل جمعیت را تشکیل می‌دهد.

شکل (۴) مقایسه خروجی‌های دو رویکرد را در تکرارهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ ارائه می‌نماید. همان‌گونه که از مقادیر اعتمادپذیری در شکل (۴) مشهود است، در این بخش صرفاً از حالت پرتوان شبکه استفاده گردیده و از حالت کم‌توان صرف‌نظر شده است. علت این امر، محدودیت تعداد پاسخ‌های موجود در حالت کم‌توان می‌باشد (۳ پاسخ برای رویکرد تجمیعی و ۱ پاسخ برای رویکرد تفکیکی)؛ لذا از این پاسخ‌ها صرف‌نظر گردیده است. با توجه به نتایج مندرج در شکل (۴)، در تمامی تکرارها، رویکرد دوم عملکرد مطلوب‌تری را نسبت به رویکرد تجمیعی نشان داده است و به‌طور میانگین، بهبود جبهه پارتو برای تکرارهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ به ترتیب معادل ۷،۷۲، ۱۱،۵۱، ۱۱،۳۴ و ۹،۵۷ درصد می‌باشد. از منظر گستردگی، رویکرد تجمیعی عملکرد مناسب‌تری را ارائه نموده و محدوده اعتمادپذیری آن از ۱،۴۳۹ تا ۱،۶۶۲ را در بر می‌گیرد، در حالی که رویکرد تفکیکی محدوده اعتمادپذیری از ۱،۴۶۹ تا ۱،۶۶۰ را شامل می‌شود. دلیل این امر این است که در رویکرد تجمیعی احتمال بیشتری به انتخاب لوله موازی و جایگزین تخصیص یافته است، در صورتی که در رویکرد تفکیکی احتمال انتخاب بین مقادیر لوله موازی، لوله جایگزین و عدم تغییر یکسان می‌باشد که این موضوع منجر به افزایش تنوع پاسخ‌ها در رویکرد تجمیعی گردیده است.

همانگونه که در شکل (۴) مشخص است، هر کدام از روش‌ها دارای جواب‌های بهینه متنوعی هستند که انتخاب هر جواب به عوامل مختلفی بستگی دارد. یکی از مسائل مهم در بهینه‌سازی چندهدفه، انتخاب راه‌حل نهایی از میان راه‌حل‌های موجود در جبهه پارتو نهایی می‌باشد. این انتخاب می‌تواند بر اساس عوامل متنوعی صورت پذیرد که شامل محدودیت‌های بودجه، میزان ریسک‌پذیری کارفرما، اولویت‌های عملیاتی کارفرما و شرایط خاص هر پروژه می‌باشد. در اکثر پروژه‌های عمرانی، محدودیت‌های بودجه و هزینه مهم‌ترین معیار تصمیم‌گیری برای کارفرما محسوب می‌شود. تصمیم‌گیرنده معمولاً با در نظرگیری بودجه مصوب پروژه، از میان راه‌حل‌های موجود در جبهه پارتو، راه‌حلی را انتخاب می‌نماید که علاوه بر رعایت محدودیت بودجه، بهترین عملکرد را از لحاظ سایر اهداف نیز ارائه دهد. در این پژوهش، با توجه به عدم وجود فرضیه مشخص در خصوص میزان هزینه و بودجه در دسترس، راه‌حل خاصی از جبهه پارتو انتخاب نگردیده است. هدف اصلی این مطالعه، ارائه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه می‌باشد که تصمیم‌گیرنده بتواند بر اساس شرایط و محدودیت‌های خاص پروژه خود، مناسب‌ترین گزینه را انتخاب نماید.

جدول (۲) دو راه حل از جبهه پارتو نهایی در رویکرد تجمیعی و تفکیکی را مورد مقایسه قرار داده است. راه حل های مندرج در این جدول دارای مقادیر اعتماد پذیری تقریباً یکسان می باشند. همچنین راه حل های موجود در جدول (۲) برای هر دو رویکرد تجمیعی و تفکیکی در شکل (۴-ت) به صورت متمایز نمایش داده شده اند.

جدول (۲) مقایسه ی خروجی دو رویکرد تجمیعی و تفکیکی برای شبکه جدید باغملک

دوم			فاز اول			
رویکرد تجمیعی و تفکیکی برای (۲-ب) خروجی های رویکرد تجمیعی و تفکیکی برای فاز			رویکرد تجمیعی و تفکیکی برای (۲-آ) خروجی های رویکرد تجمیعی و تفکیکی برای			
رویکرد تفکیکی قطر (mm)		شماره لوله	رویکرد تفکیکی قطر (mm)		شماره لوله	
بردار ثانویه	بردار اصلی		بردار ثانویه	بردار اصلی		
۰	۰	۱	۲۶۸/۲۰	۱	۳۴۱/۲۰	۱
۰	۰	۲	۵۳۷/۵۰	۱	۶۰۵/۷۷	۲
۰	۰	۳	۱۷۰/۶۰	۱	۱۷۰/۶۰	۳
۰	۰	۴	۵۳۷/۵۰	۱	۵۳۷/۵۰	۴
۰	۰	۵	۵۳۷/۵۰	۱	۵۳۷/۵۰	۵
۱۰۶/۶۰	۱	۶	۵۳/۶۰	۱	۷۶/۶۰	۶
۰	۰	۷	۵۳/۶۰	۱	۶۳/۸۰	۷
۰	۰	۸	۳۸۳/۸۹	۱	۳۴۱/۲۰	۸
۵۳/۶۰	۲	۹	۲۱۳/۲۰	۱	۲۶۸/۲۰	۹
۰	۰	۱۰	۱۳۶/۴۰	۱	۱۰۶/۶۰	۱۰
۶۳/۸۰	۱	۱۱	۶۳/۸۰	۱	۷۶/۶۰	۱۱
۰	۰	۱۲	۶۳/۸۰	۱	۶۳/۸۰	۱۲
۰	۰	۱۳	۱۰۶/۶۰	۱	۹۳/۸۰	۱۳
۰	۰	۱۴	۶۳/۸۰	۱	۱۰۶/۶۰	۱۴
۰	۰	۱۵	۹۳/۸۰	۱	۱۷۰/۶۰	۱۵
۰	۰	۱۶	۵۳۷/۵۰	۱	۵۳۷/۵۰	۱۶
۰	۰	۱۷	۵۳۷/۵۰	۱	۵۳۷/۵۰	۱۷
۰	۰	۱۸	۳۸۳/۸۹	۱	۳۴۱/۲۰	۱۸
۰	۰	۱۹	۳۴۱/۲۰	۱	۳۴۱/۲۰	۱۹
۰	۰	۲۰	۲۶۸/۲۰	۱	۲۱۳/۲۰	۲۰
۰	۰	۲۱	۳۸۳/۸۹	۱	۳۸۳/۹۰	۲۱
۰	۰	۲۲	۳۸۳/۸۹	۱	۳۸۳/۹۰	۲۲
۰	۰	۲۳	۱۷۰/۶۰	۱	۱۳۶/۴۰	۲۳
۰	۰	۲۴	۱۷۰/۶۰	۱	۱۷۰/۶۰	۲۴
۱۷۰/۶۰	۱	۲۵	۰	۰	۰	۲۵
۱۳۶/۴۰	۱	۲۶	۰	۰	۰	۲۶
۲۱۳/۲۰	۲	۲۷	۲۱۳/۲۰	۱	۲۶۸/۲۰	۲۷
۰	۰	۲۸	۱۳۶/۴۰	۱	۱۳۶/۴۰	۲۸
۹۳/۸۰	۱	۲۹	۰	۰	۰	۲۹
۱۳۶/۴۰	۱	۳۰	۰	۰	۰	۳۰
۹۳/۸۰	۱	۳۱	۰	۰	۰	۳۱
۹۳/۸۰	۱	۳۲	۰	۰	۰	۳۲

.	.	۹۳/۸۰ (rp)	۳۳	۱۳۶/۴.	۱	۷۶/۶.	۳۳
.	.	۹۳/۸۰ (rp)	۳۴	۱۳۶/۴.	۱	۷۶/۶.	۳۴
.	.	۹۳/۸۰ (rp)	۳۵	۱۳۶/۴.	۱	۱۳۶/۴.	۳۵
۱۰۶/۶.	۲	.	۳۶	۲۱۳/۲.	۱	۲۱۳/۲.	۳۶
.	.	.	۳۷	۲۱۳/۲.	۱	۲۱۳/۲.	۳۷
.	.	۹۳/۸۰ (rp)	۳۸	۹۳/۸.	۱	۵۳/۶.	۳۸
.	.	۷۶/۶ (pp)	۳۹	۳۸۳/۹.	۱	۳۸۳/۹.	۳۹
.	.	۳۴۱/۲ (pp)	۴۰	۳۸۳/۹.	۱	۳۴۱/۲.	۴۰
.	.	۱۳۶/۴ (rp)	۴۱	۱۳۶/۴.	۱	۹۳/۸.	۴۱
.	.	.	۴۲	۲۶۸/۲.	۱	۲۶۸/۲.	۴۲
.	.	۲۱۳/۲ (pp)	۴۳	۳۸۳/۹.	۱	۳۴۱/۲.	۴۳
۱۷۰/۶.	۱	۱۷۰/۶ (np)	۴۴	.	.	.	۴۴
۱۷۰/۶.	۱	۱۳۶/۴ (np)	۴۵	.	.	.	۴۵
۲۱۳/۲.	۱	۱۳۶/۴ (np)	۴۶	.	.	.	۴۶
۶۳/۸.	۱	۷۶/۶ (np)	۴۷	.	.	.	۴۷
۱۰۶/۶.	۱	۹۳/۸۰ (np)	۴۸	.	.	.	۴۸
.	.	.	۴۹	۱۷۰/۶.	۱	۷۶/۶.	۴۹
.	.	.	۵۰	۱۷۰/۶.	۱	۷۶/۶.	۵۰
.	.	.	۵۱	۱۷۰/۶.	۱	۱۷۰/۶.	۵۱
.	.	۳۴۱/۲ (pp)	۵۲	۳۸۳/۹.	۱	۳۴۱/۲.	۵۲
.	.	۳۴۱/۲ (pp)	۵۳	۲۶۸/۲.	۱	۳۴۱/۲.	۵۳
۱۷۰/۶.	۱	۱۳۶/۴ (np)	۵۴	.	.	.	۵۴
.	.	۱۷۰/۶ (rp)	۵۵	۱۷۰/۶.	۱	۱۳۶/۴.	۵۵
.	.	.	۵۶	۲۶۸/۲.	۱	۳۴۱/۲.	۵۶
.	.	۱۰۶/۶ (pp)	۵۷	۲۱۳/۲.	۱	۲۱۳/۲.	۵۷
۱۰۶/۶.	۱	۱۰۶/۶ (np)	۵۸	.	.	.	۵۸
۲۱۳/۲.	۱	۲۱۳/۲ (np)	۵۹	.	.	.	۵۹
۱۳۶/۴.	۱	۱۳۶/۴ (np)	۶۰	.	.	.	۶۰
۷۶/۶.	۱	۱۰۶/۶ (np)	۶۱	.	.	.	۶۱
۱۰۶/۶.	۱	۱۰۶/۶ (np)	۶۲	.	.	.	۶۲
.	.	۹۳/۸۰ (pp)	۶۳	۱۷۰/۶.	۱	۱۳۶/۴.	۶۳
.	.	۱۰۶/۶ (pp)	۶۴	۱۷۰/۶.	۱	۱۷۰/۶.	۶۴
.	.	۷۶/۶ (pp)	۶۵	۱۷۰/۶.	۱	۱۷۰/۶.	۶۵
.	.	.	۶۶	۱۷۰/۶.	۱	۱۳۶/۴.	۶۶
۷۶/۶.	۱	۹۳/۸۰ (np)	۶۷	.	.	.	۶۷
۶۳/۸.	۱	۶۳/۸ (np)	۶۸	.	.	.	۶۸
۱۷۰/۶.	۱	۱۳۶/۴ (np)	۶۹	.	.	.	۶۹
۱۰۶/۶.	۱	۱۳۶/۴ (np)	۷۰	.	.	.	۷۰
۱۰۶/۶.	۱	۱۰۶/۶ (np)	۷۱	.	.	.	۷۱
۱۰۶/۶.	۱	۹۳/۸۰ (np)	۷۲	.	.	.	۷۲
۵۳/۶.	۱	۹۳/۸۰ (np)	۷۳	.	.	.	۷۳
۷۶/۶.	۱	۵۳/۶ (np)	۷۴	.	.	.	۷۴
۶۳/۸.	۱	۵۳/۶ (np)	۷۵	.	.	.	۷۵
۶۳/۸.	۱	۶۳/۸ (np)	۷۶	.	.	.	۷۶
۱۳۶/۴.	۱	۱۷۰/۶ (np)	۷۷	.	.	.	۷۷
۱۳۶/۴.	۱	۱۰۶/۶ (np)	۷۸	.	.	.	۷۸
۹۳/۸.	۱	۱۰۶/۶ (np)	۷۹	.	.	.	۷۹

۱۷۰/۶۰	۱	۱۳۶/۴۰ (np)	۸۰	.	.	.	۸۰
۵۳/۶۰	۱	۹۳/۸۰ (np)	۸۱	.	.	.	۸۱
۵۳/۶۰	۱	۹۳/۸۰ (np)	۸۲	.	.	.	۸۲
۵۳/۶۰	۱	۱۰۶/۶۰ (np)	۸۳	.	.	.	۸۳
۱۰۶/۶۰	۱	۹۳/۸۰ (np)	۸۴	.	.	.	۸۴
۵۳/۶۰	۱	۷۶/۶۰ (np)	۸۵	.	.	.	۸۵
۷۶/۶۰	۱	۹۳/۸۰ (np)	۸۶	.	.	.	۸۶
۱۳۶/۴۰	۱	۱۷۰/۶۰ (np)	۸۷	.	.	.	۸۷
.	.	.	۸۸	۶۳/۸۰	۱	۹۳/۸۰	۸۸
۱۳۶/۴۰	۱	۱۰۶/۶۰ (np)	۸۹	.	.	.	۸۹
.	.	.	۹۰	۲۱۳/۲۰	۱	۲۱۳/۲۰	۹۰
۳۶۳۳	۶۷۵۹	هزینه فاز دوم (میلون ریال)	۱۶۸۱۵	۱۶۱۶۱	هزینه فاز اول (میلیون ریال)		
۱/۷۲۰۸	۱/۷۳۷۴	اعتمادپذیری	۱/۴۷۹۳	۱/۴۶۱۱	اعتمادپذیری		

شایان ذکر است که در فاز اول تمامی لوله‌ها جدید می‌باشند و در فاز دوم برای رویکرد تجمیعی، علائم (pp)، (rp) و (np) به ترتیب نشان‌دهنده لوله موازی، لوله جایگزین و لوله جدید می‌باشند.

دو راه‌حل ارائه شده در جدول (۲) از منظر معیار اعتمادپذیری به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که دارای معیار اعتمادپذیری یکسان باشند، به طوری که معیار میانگین اعتمادپذیری برای هر دو رویکرد برابر با ۱٫۶ می‌باشد. در فاز اول، رویکرد تفکیکی دارای معیار اعتمادپذیری بهتری است و برای فاز دوم، رویکرد تجمیعی در این معیار عملکرد مطلوب‌تری ارائه داده است. با توجه به جدول (۲)، در فاز اول تمامی لوله‌هایی که اجرا گردیده‌اند، مربوط به مناطق جدید می‌باشند. لوله‌هایی که قطر آن‌ها صفر است، در این فاز اجرا نمی‌شوند. در فاز دوم برای رویکرد تجمیعی، تعداد لوله‌هایی که قطر آن‌ها تغییر نکرده (قطر آن‌ها صفر در نظر گرفته شده است) برابر با ۱۹ لوله می‌باشد که نسبت به تعداد کل لوله‌ها حدود ۲۱ درصد (۹۰/۱۹) را تشکیل می‌دهد. همچنین تعداد لوله‌های موازی و جایگزین شده در این فاز به ترتیب برابر با ۲۴ و ۸ لوله می‌باشد که نسبت به کل لوله‌ها برابر با ۲۷ و ۹ درصد است. تعداد لوله‌هایی که در مناطق جدید نصب می‌گردند در هر دو رویکرد یکسان بوده و برابر ۳۹ لوله است که حدود ۴۳ درصد کل لوله‌های شبکه را شامل می‌شود. برای رویکرد تفکیکی در فاز دوم، تعداد لوله‌هایی که قطر آن‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند برابر با ۴۶ لوله می‌باشد که ۵۲ درصد کل لوله‌های شبکه را تشکیل می‌دهد. با مقایسه تعداد لوله‌های بدون تغییر در رویکرد تفکیکی با رویکرد تجمیعی، افزایش ۲٫۵ برابری تعداد لوله‌های بدون تغییر مشاهده می‌گردد. همچنین تعداد لوله‌های موازی و جایگزین به ترتیب برابر با ۳ و ۲ لوله می‌باشد که تقریباً ۳ و ۲ درصد تعداد کل لوله‌های شبکه را تشکیل می‌دهد. علت این موضوع، نحوه مدل‌سازی بردار متغیرهای تصمیم است که در رویکرد تفکیکی لحاظ گردیده است. در این رویکرد، بردار متغیرهای تصمیم به گونه‌ای مدل شده‌اند که احتمال انتخاب عدم تغییر در قطر لوله (انتخاب مقدار صفر) برابر با ۳۳ درصد می‌باشد، در حالی

که این احتمال برای رویکرد تجمیعی تنها حدود ۴ درصد است. با مقایسه هزینه‌های هر دو رویکرد برای فاز اول، مشخص می‌گردد که رویکرد تجمیعی در این فاز عملکرد بهتری نسبت به رویکرد تفکیکی داشته و حدود ۶۵۴ میلیون ریال شبکه ارزان‌تری را طراحی نموده است. اما در فاز دوم، به دلیل استفاده مناسب‌تر از ظرفیت شبکه در فاز اول، هزینه‌های رویکرد تفکیکی نسبت به رویکرد تجمیعی حدود نصف کاهش یافته است و این عامل موجب شده است که در مجموع از منظر هزینه، رویکرد تفکیکی در کل دو فاز هزینه ارزان‌تری را ارائه دهد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

روش طراحی دینامیکی شبکه‌های آبرسانی، با بهره‌گیری از فازبندی دوره طرح به طراحی و اجرای شبکه‌های آبرسانی می‌پردازد. از جمله مزایای این روش که در پژوهش‌های پیشین ارائه گردیده است، می‌توان به کاهش هزینه، افزایش اعتمادپذیری و انعطاف‌پذیری بیشتر در مواجهه با عدم قطعیت‌های محتمل در زمان بهره‌برداری از شبکه اشاره نمود. پژوهش حاضر به بررسی تأثیر رویکردهای متفاوت مدل‌سازی بردار متغیر تصمیم‌گیری در روش چندفازی اختصاص یافته است.

جهت ارزیابی اثرات رویکردهای تجمیعی و تفکیکی مدل‌سازی بردار تصمیم‌گیری بر روش ساخت و ساز چندفازی، از شبکه جدید باغملک استفاده گردیده است. با مقایسه جبهه پارتوی حاصله برای هر دو رویکرد، مشخص گردید که رویکرد تفکیکی موجب بهبود ۱۰ درصدی هزینه پاسخ‌ها نسبت به رویکرد اول می‌گردد. مقایسه دو پاسخ موجود در جبهه پارتو برای رویکردهای تجمیعی و تفکیکی بیانگر آن است که در رویکرد تفکیکی، تعداد لوله‌های بدون تغییر تقریباً ۲٫۵ برابر رویکرد تجمیعی می‌باشد. در رویکرد تفکیکی، بردار متغیرهای تصمیم به‌گونه‌ای مدل‌سازی شده‌اند که احتمال انتخاب عدم تغییر در قطر لوله معادل ۳۳ درصد است، این در حالی است که این احتمال برای رویکرد تجمیعی حدود ۴ درصد می‌باشد. این امر موجب می‌شود شبکه از ظرفیت لوله‌های فرسوده بهره‌برداری نماید و به همین سبب است که در اعتمادپذیری یکسان، میزان هزینه رویکرد تفکیکی به‌صورت میانگین تقریباً ۱۰ درصد کمتر از رویکرد تجمیعی می‌باشد. از منظر عملکرد الگوریتم بهینه‌ساز نیز، رویکرد تفکیکی موجب دستیابی سریع‌تر الگوریتم بهینه‌سازی به پاسخ‌های امکان‌پذیر می‌گردد. تعداد پاسخ‌های امکان‌پذیر برای رویکرد تفکیکی نیز دو برابر پاسخ‌های امکان‌پذیر برای رویکرد تجمیعی است. همچنین در تکرار نهایی، ۹۰ درصد جمعیت کل (۳۲۴ پاسخ از ۳۶۰ پاسخ) در رویکرد تفکیکی در زمره پاسخ‌های امکان‌پذیر قرار می‌گیرند؛ این در حالی است که برای رویکرد تجمیعی، درصد پاسخ‌های امکان‌پذیر معادل ۵۶ درصد (۲۰۰ پاسخ از ۳۶۰ پاسخ) می‌باشد. از لحاظ زمان محاسبات برای هر تکرار، رویکرد تجمیعی به‌صورت میانگین در هر تکرار حدود ۳ ثانیه زمان کمتری نسبت به رویکرد تفکیکی نیاز دارد که این امر ناشی از کمتر بودن تعداد متغیرهای

بردار تصمیم‌گیری برای رویکرد تجمیعی نسبت به رویکرد تفکیکی می‌باشد.

۶-مراجع

- Alperovits, E., and Shamir, U, (1977), "Design of optimal water distribution systems", Water resources research, 13(6), 885-900. <https://doi.org/10.1029/WR013i006p00885>
- Bahrami Chegeni, I., Riyahi, M. M., Bakhshipour, A. E., Azizipour, M., and Haghghi, A., (2025), "Developing Machine Learning Models for Optimal Design of Water Distribution Networks Using Graph Theory-Based Features", Water, 17(11), 1654. <https://doi.org/10.3390/w17111654>
- Creaco, E., and Franchini, M, (2012), "Fast network multi-objective design algorithm combined with an a posteriori procedure for reliability evaluation under various operational scenarios", Urban Water Journal, 9(6), 385-399. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.690432>
- Creaco, E., Franchini, M., and Walski, T. M, (2014), "Accounting for phasing of construction within the design of water distribution networks", Journal of Water Resources Planning and Management, 140(5), 598-606. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000358](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000358)
- Creaco, E., Franchini, M., and Walski, T. M, (2015), "Taking account of uncertainty in demand growth when phasing the construction of a water distribution network", Journal of Water Resources Planning and Management, 141(2), 04014049. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000441](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000441)
- Creaco, E., Franchini, M., and Walski, T. M, (2016), "Comparison of various phased approaches for the constrained minimum-cost design of water distribution networks", Urban Water Journal, 13(3), 270-283. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.991330>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. A. M. T, (2002), "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", IEEE transactions on evolutionary computation, 6(2), 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Dell'Aira, F., Cancelliere, A., Creaco, E., and Pezzinga, G, (2021), "Novel comprehensive approach for phasing design and rehabilitation of water distribution networks", Journal of Water Resources Planning and Management, 147(3), 04021001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.00013](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.00013)
- Engelhardt, M, (1999), "Development of a strategy for the optimum replacement of water mains", Doctoral dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Adelaide.
- Farmani, R., Walters, G. A., and Savic, D. A., (2005), "Trade-off between total cost and reliability for Anytown water distribution network", Journal of water resources planning and management, 131(3), 161-171. <https://doi.org/10.2166/hydro.2006.019b>

Farmani, R., Walters, G., and Savic, D. (2006), "Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: total cost vs. reliability vs. water quality", *Journal of hydroinformatics*, 8(3), 165-179. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131:3\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:3(161))

Haghighi, A., Samani, H. M., and Samani, Z. M. (2011), "GA-ILP method for optimization of water distribution networks", *Water resources management*, 25(7), 1791-1808. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9775-4>

Krapivka, A., and Ostfeld, A. (2009), "Coupled genetic algorithm—linear programming scheme for least-cost pipe sizing of water-distribution systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(4), 298-302. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2009\)135](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135)

Lansey, K. E., Basnet, C., Mays, L. W., and Woodburn, J. (1992), "Optimal maintenance scheduling for water distribution systems", *Civil Engineering Systems*, 9(3), 211-226. <https://doi.org/10.1080/02630259208970650>

Minaei, A., Abusamra, S., Hajibabaei, M., Savic, D., Zecchin, A. C., Creaco, E., and Sitzenfrie, R. (2024), "Optimized phased planning for dynamic rehabilitation of integrated municipal infrastructure", *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(7), 1389-1405. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.083>

Minaei, A., Haghighi, A., and Ghafouri, H. R. (2019), "Computer-aided decision-making model for multiphase upgrading of aged water distribution mains", *Journal of water resources planning and management*, 145(5), 04019008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001070](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001070)

Poojitha, S. N., and Jothiprakash, V. (2024), "Robust and reliable design alternatives to water distribution networks: introducing a penalty-free hybrid metaheuristic multiobjective algorithm with a posterior performance investigation model", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150(12), 04024055. <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6420>

Riyahi, M. M., Bakhshipour, A. E., and Haghighi, A. (2023), "Probabilistic warm solutions-based multi-objective optimization algorithm, application in optimal design of water distribution networks", *Sustainable Cities and Society*, 91, 104424. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104424>

Riyahi, M. M., Giudicianni, C., Haghighi, A., and Creaco, E. (2024), "Coupled multi-objective optimization of water distribution network design and partitioning: a spectral graph-theory approach", *Urban Water Journal*, 21(6), 745-756. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2024.2352797>