

Technical Note

یادداشت فنی

Investigating the Water Losses Cost and the Effects of Pipe Grouping on Optimum Pipe Replacement Schedule in Water Distribution Networks

بررسی تاثیر هزینه آب تلف شده و گروه بندی لوله‌ها در زمان بهینه بازسازی شبکه‌های توزیع آب

M. Tabesh^{1*}, A. Shirzad²
and M. Maghari Esfahani³

مسعود تابش^{۱*}، اکبر شیرزاد^۲
و محمد مغاری اصفهانی^۳

Abstract

Aging in urban water distribution networks would lead to an increased number of bursts. Beside leakage control and pressure management, the last solution in this regard is rehabilitation and replacement of main pipes in the networks. In this research the optimum time for pipe replacement in water distribution networks is obtained by an optimization model applying genetic algorithm, which minimizes the present value of the total costs. According to the obtained results, the economic constraint increases the total costs of replacement while the hydraulic constraint would decrease it. Additionally, considering the cost of water losses and grouping replacement would increase the total costs.

Keywords: Optimization, Urban water distribution network, Genetic Algorithm, Group replacement, Water losses cost.

Received: July 23, 2012
Accepted: October 31, 2012

چکیده

افزایش عمر شبکه‌های توزیع آب شهری در بسیاری از شهرهای جهان باعث شده است تا تعداد حوادثی که در طول سال در این شبکه‌ها اتفاق می‌افتد افزایش یابد. در کنار راهکارهایی از جمله مدیریت حوادث، مدیریت نشت و مدیریت فشار، آخرین راه‌حل مقابله با این پدیده، بازسازی و نوسازی شبکه‌ها می‌باشد. در این تحقیق با ارائه یک مدل بهینه‌سازی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، زمان‌بندی بهینه‌ای برای تعویض لوله‌ها ارائه شده است که در صورت رعایت آن، کل هزینه‌های تحمیلی به سیستم در یک افق برنامه‌ریزی مشخص، حداقل می‌شود. طبق نتایج به دست آمده اعمال قید اقتصادی، گروه‌بندی لوله‌های قابل تعویض و هزینه آب هدررفته باعث افزایش هزینه کل و اعمال قید هیدرولیکی باعث کاهش هزینه کل فرآیند بازسازی می‌شود.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، شبکه توزیع آب شهری، الگوریتم ژنتیک، گروه‌بندی تعویض، هزینه آب هدر رفته.

تاریخ دریافت مقاله: ۲ مرداد ۱۳۹۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۰ آبان ۱۳۹۱

1- Professor, Center of Excellence for Engineering and Management of Infrastructures, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: mtabesh@ut.ac.ir.
2- PhD Candidate, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
3- MSc graduate, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

۱- استاد و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

برحسب جنس و قطر لوله‌ها بین ۰/۰۵ و ۰/۱۵ متغیر است و D : قطر لوله (mm) است.

۲-۲- تابع هدف و قیود در مدل بهینه سازی

تابع هدف در نظر گرفته شده در این تحقیق مطابق رابطه (۲) شامل هزینه تعمیر لوله‌ها تا روز تعویض (ترم اول رابطه)، هزینه تعویض لوله‌ها (ترم دوم)، هزینه تعمیر لوله‌های تعویض شده تا انتهای افق زمانی برنامه‌ریزی (ترم سوم) و هزینه آب هدررفته (ترم چهارم) می‌باشد.

$$F = \text{Min} \left(\sum_{i=1}^{NP} \frac{BR(d_i) \times BC(d_i) \times L_i \times t_i}{(1+r)^{t_i}} + \sum_{i=1}^{NP} \frac{R(d_{ni}) \times L_{ni}}{(1+r)^{t_{ni}}} + \sum_{i=1}^{NP} \frac{BR(d_{ni}) \times BC(d_{ni}) \times L_{ni} \times (T - t_{ni})}{(1+r)^{t_{ni}}} + \sum_{i=1}^{NP} \frac{BR(d_i) \times L_i \times A(d_i) \times V(d_i) \times t' \times P_w}{(1+r)^{t_i}} \right) \quad (2)$$

که $BR(d_i)$: نرخ حوادث لوله i با قطر d_i ، $BC(d_i)$: هزینه رفع هر حادثه برای لوله i با قطر d_i ، L_i : طول لوله i (m)، t_i : زمان تعویض لوله i ، r : نرخ بهره سالیانه، $R(d_{ni})$: هزینه تعویض لوله i با قطر d_i ، L_{ni} : طول لوله تعویضی i (m)، t_{ni} : زمان تعویض لوله i ، T : افق زمانی برنامه‌ریزی، n : اندیس لوله تعویض شده یا نو، NP : تعداد لوله‌ها، $A(d_i)$: سطح مقطع لوله i (m²)، $V(d_i)$: سرعت متوسط در لوله i (m/s)، t' : فاصله زمانی بین شروع حادثه و رفع آن (sec)، NJ : تعداد گره‌ها و P_w : قیمت واحد متر مکعب آب (ریال) می‌باشد. در این تابع هدف ترمهای اول و دوم مشابه ترمهای بکار رفته در تابع هدف در نظر گرفته شده توسط Dandy and Engelhardt (2001) و Dandy (2006) بوده ولی ترمهای سوم و چهارم به عنوان نوآوری به تابع هدف اضافه شده‌اند. نرخ بهره سالیانه در طول دوره بررسی، سالانه برابر با ۱۵ درصد و افق زمانی برنامه‌ریزی برابر با ۱۰ سال در نظر گرفته شده است.

اساسی‌ترین محدودیت پروژه‌های عمرانی، عامل اقتصادی و محدودیت سرمایه‌گذاری است؛ لذا در تابع هدفی که برای بهینه‌سازی بازسازی شبکه‌های آب تعریف می‌شود، مهمترین محدودیت در نظر گرفته شده بحث سقف بودجه است. قیود هیدرولیکی و اقتصادی در نظر گرفته شده به ترتیب مطابق روابط (۳) و (۴) هستند.

با توجه به محدودیت‌های مالی موجود برای شرکت‌های آب و فاضلاب و همچنین هزینه بسیار بالای تعویض و بازسازی شبکه‌ها از یک سو و بحران آب و جلوگیری از هدررفتن آب به هر وسیله ممکن از سوی دیگر، داشتن نوعی نگاه علمی و دقیق به موضوع بازسازی شبکه‌های توزیع آب شهری و انجام مطالعه و تحقیق در ارتباط با بحث بهینه‌سازی این عملیات ضرورتی اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد تا به این وسیله از منابع مالی کشور به بهترین نحو ممکن استفاده شود.

روش‌های گوناگونی برای تحلیل اقتصادی هزینه‌های بازسازی شبکه‌های توزیع آب وجود دارد. به عنوان نمونه Ramos (1985) سعی کرد تا روشی برای ارزیابی منافع ناشی از تعویض لوله ارائه کند که هدف آن معرفی نسبت سود به هزینه به عنوان معیاری برای تصمیم‌گیری در مورد تعویض لوله بود و در صورتی که این نسبت از یک مقدار مشخص بیشتر شود لوله تعویض می‌شود. Tabesh and Saber (2012) نیز با ارائه یک مدل مفهومی به همراه استفاده از ابزار مدل‌سازی هیدرولیکی و سیستم GIS برنامه‌ای برای تعویض لوله‌ها ارائه کردند.

هدف از این تحقیق ارائه روشی برای بهینه‌سازی فرآیند بازسازی شبکه‌های آب می‌باشد. بدین منظور با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با در نظر گرفتن یک تابع هدف اقتصادی و اعمال قیود اقتصادی، هیدرولیکی و لحاظ کردن هزینه آب هدررفته و گروه‌بندی تعویض لوله‌ها، الگوی زمان‌بندی بهینه‌ای برای تعویض لوله‌ها ارائه می‌شود که در صورت رعایت آن هزینه‌های تعویض و تعمیر لوله‌ها، در یک افق زمانی مشخص حداقل می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نرخ حوادث در شبکه‌های توزیع آب شهری

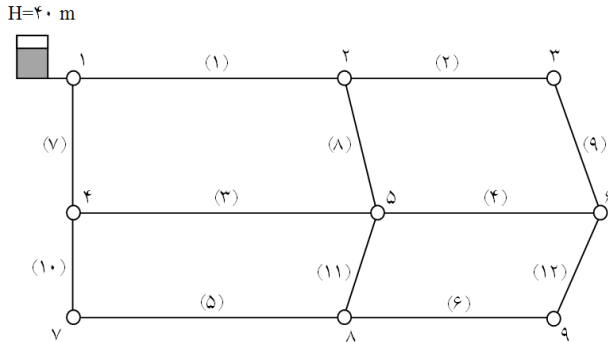
برای برآورد هزینه تعمیرات شبکه لازم است تا از رابطه‌ای برای تخمین نرخ حوادث شبکه استفاده شود. یکی از روابطی که برای تخمین نرخ حوادث شبکه توسط محققین مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد، رابطه (۱) است (Shamir and Howard, 1979).

$$\lambda(t) = \lambda_0 e^{\alpha t} \quad , \quad \lambda_0 = 0.269 e^{-0.0023D} \quad (1)$$

که $\lambda(t)$: نرخ شکست در سال t (year/km/تعداد شکست)، λ_0 : نرخ شکست در سال پایه، α : نرخ رشد شکست لوله‌ها (year⁻¹) که

$$30\text{ m} < P_j < 50\text{ m} \quad , \quad 0.3\text{ m/s} < V_i < 2\text{ m/s} \quad (3)$$

برای ارزیابی روش ارائه شده از یک شبکه نمونه (شکل ۱) با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ استفاده شده و سناریوهای مختلف بازسازی (جدول ۲) بر روی آن اجرا و نتایج حاصل (جدول ۳) مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱- شبکه نمونه مورد ارزیابی
(Luong and Nagar, 2001)

$$\sum_{i=1}^{NP} R(d_{ni}) \times L_i \leq AB \quad (4)$$

که P_j : فشار در گره j ، V_i : سرعت در لوله i و AB : بودجه تخصیص یافته سالانه برای بازسازی می‌باشد و به علت ساختار اقتصادی موجود در مجموعه‌های دولتی، مازاد بودجه هر سال به سال بعدی منتقل نمی‌گردد.

در این تحقیق مدل بازسازی لوله‌ها در محیط نرم افزار MATLAB7 با ایجاد ارتباط بین الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی (EPANET) در شرایط (سناریوهای) مختلف تهیه شده است.

جدول ۱- مشخصات شبکه نمونه و هزینه‌های تعمیر و تعویض لوله‌ها

شماره لوله	طول لوله (m)	قطر لوله (mm)	شماره گره	تقاضای گرهی (lit/sec)	قطر لوله (mm)	متوسط هزینه تعمیر (ریال)	هزینه تعویض (متر/ریال)
۱، ۳، ۴	۵۰	۲۵۰	۱ (مخزن)	-	۱۰۰	۹۴۵۰۰۰۰	۵۷۰۰۰۰
۲	۴۰	۱۵۰	۲	۴۰	۱۵۰	۱۰۸۰۰۰۰۰	۷۲۰۰۰۰
۵	۵۰	۳۰۰	۳، ۵ و ۸	۲۰	۲۰۰	۱۳۶۲۰۰۰۰	۸۴۰۰۰۰
۶	۴۰	۲۵۰	۴ و ۷	۳۰	۲۵۰	۱۶۲۰۰۰۰۰	۹۹۰۰۰۰
۷	۲۵	۱۵۰	۶ و ۹	۱۰	۳۰۰	۱۶۸۰۰۰۰۰	۱۰۳۲۰۰۰۰
۸، ۹، ۱۰، ۱۲	۲۰	۱۰۰					
۱۱	۲۰	۱۵۰					

جدول ۲- سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده در مدل بهینه‌سازی

سناریو	هزینه تعمیر لوله‌ها تا روز تعویض	هزینه تعویض لوله‌ها	هزینه تعمیر لوله‌های تعویض شده تا انتهای افق زمانی برنامه‌ریزی	هدررفته آب	قید اقتصادی	قید هیدرولیکی	گروه‌بندی تعویض
۱	*	*	*	*		*	*
۲	*	*	*	*		*	*
۳	*	*	*	*		*	*
۴	*	*	*	*	*	*	*
۵	*	*	*	*	*	*	*
۶	*	*	*	*	*	*	*
۷	*	*	*	*	*	*	*
۸	*	*	*	*	*	*	*
۹	*	*	*	*	*	*	*
۱۰	*	*	*	*	*	*	*
۱۱	*	*	*	*	*	*	*
۱۲	*	*	*	*	*	*	*
۱۳	*	*	*	*	*	*	*

جدول ۳- زمانبندی بهینه تعویض لوله‌ها بر حسب سال در سناریوهای مختلف

شماره لوله	سناریو												
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۳±
۱	۴/۱	۳/۲	۴/۵	۱/۶	۵/۹	۳/۵	۳/۱	۴/۶	۵	۷/۱	۶/۴	۷/۶	۷/۴
۲	۴/۵	۳/۹	۴/۱	۱/۷	۶/۱	۵/۱	۴/۸	۷	۴/۶	۴/۹	۶/۶	۴/۶	۶/۷
۳	۲/۵	۳/۷	۴	۳/۳	۵/۲	۴/۵	۲/۷	۶	۴/۴	۵/۱	۶/۶	۶/۹	۷
۴	۱/۱	۲/۵	۱/۳	۱/۸	۳/۴	۲/۵	۳	۳/۴	۳/۸	۳/۸	۴/۱	۳/۵	۶/۲
۵	۱/۷	۴/۳	۴/۵	۲/۱	۶/۴	۱/۸	۱/۹	۲/۸	۶/۳	۶/۳	۶/۱	۵/۹	۹/۸
۶	۱/۷	۴/۲	۳/۶	۲	۶/۱	۲/۸	۰	۵/۸	۵/۲	۴/۹	۵/۲	۸/۳	۷/۵
۷	۲/۹	۳	۳/۷	۲/۸	۵/۴	۵/۱	۲/۹	۷/۳	۵/۱	۵/۱	۵/۲	۱/۳	۶/۳
۸	۴/۷	۲/۶	۵/۱	۱	۵/۳	۹/۳	۹/۹	۵/۶	۴	۹/۷	۹/۹	۲/۱	۶/۱
۹	۱/۷	۱/۹	۱/۸	۱/۲	۳/۱	۳/۶	۴/۶	۳/۹	۴/۷	۷/۱	۵/۵	۶/۱	۵/۲
۱۰	۳/۱	۲/۳	۳/۹	۲/۸	۵/۱	۴/۴	۴/۹	۸/۱	۴/۶	۴/۲	۵/۲	۴/۲	۵/۴
۱۱	۲/۴	۳/۶	۴/۳	۱/۷	۵/۷	۶/۹	۹/۸	۵/۸	۵/۷	۹/۳	۷/۷	۷/۴	۶/۷
۱۲	۱/۷	۱/۹	۱/۷	۱/۸	۳/۳	۵/۲	۴/۹	۴/۵	۴/۸	۶/۹	۵/۴	۴/۵	۵/۲
سال تعویض	۲/۷	۳/۱	۳/۵	۲	۵/۱	۴/۶	۴/۴	۵/۴	۴/۹	۶/۲	۶/۲	۵/۲	۶/۶
هزینه (میلیون ریال)	۲۹۱/۹	۳۴۸/۵	۲۷۸/۷	۳۴۵/۷	۳۲۰/۹	۲۹۳/۵	۲۷۷/۰	۳۴۵/۷	۳۴۱/۷	۲۷۵/۳	۲۷۲/۸	۳۲۱/۲	۳۱۶/۶

لوله‌ها در سناریوی ۴ کمترین مقدار را در مقایسه با سناریوهای ۲، ۳ و ۵ دارد و بزرگترین میانگین زمان تعویض، مربوط به سناریوی ۵ است. علت این موضوع عدم حضور قید هیدرولیکی و هزینه آب هدررفته در این سناریو است، زیرا هر دو عامل ذکر شده به تعویض سریعتر لوله‌ها کمک می‌کنند.

سناریوی ۱ تلفیقی از تعدادی از سناریوهای دیگر است. مقایسه نتایج این سناریو با نتایج سناریوی ۹ نشان می‌دهد که از یک طرف اعمال قید هیدرولیکی باعث کاهش هزینه‌ها و از طرف دیگر در نظر گرفتن گروه‌بندی تعویض برای لوله‌ها باعث افزایش هزینه شده است؛ اما برآیند موارد ذکر شده نهایتاً منجر به کاهش هزینه کل شده است. علت آن حضور همزمان قید هیدرولیکی و منظور کردن هزینه آب هدررفته است که هر دو عامل ذکر شده مدل بهینه سازی را به سمت تعویض سریعتر لوله‌ها تحریک می‌کنند.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با در نظر گرفتن یک تابع هدف اقتصادی و اعمال قیود اقتصادی، هیدرولیکی و همچنین لحاظ نمودن هزینه آب هدررفته و گروه‌بندی تعویض لوله‌ها، یک مدل بهینه‌سازی برای تهیه الگوی زمان‌بندی بهینه برای تعویض لوله‌ها ارائه گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که اعمال قید اقتصادی باعث افزایش هزینه کل فرآیند بازسازی شبکه‌های توزیع آب می‌شود ولی اعمال قید هیدرولیکی باعث کاهش قطر لوله‌ها شده و در نتیجه هزینه کل فرآیند بازسازی کاهش می‌یابد. با لحاظ نمودن

همان طور که در جدول ۳ قابل مشاهده است مقایسه نتایج سناریوهای ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به خوبی بیانگر کاهش هزینه کل در سناریوهای است که در آنها قید هیدرولیکی اعمال شده است. علت این موضوع کاهش متوسط قطر لوله‌ها بعد از اعمال قید هیدرولیکی و تأثیر بالای عامل قطر لوله‌ها بر هزینه کل است. همچنین پایین‌ترین میانگین زمان تعویض در چهار سناریوی مذکور مربوط به سناریوی ۱۲ (اعمال قید اقتصادی) است. مقایسه نتایج سناریوی ۶ تا ۹ با یکدیگر نشان می‌دهد که در نظر گرفتن هزینه آب هدررفته باعث شده است مدل بهینه‌سازی تمایل به تعویض سریعتر لوله‌ها داشته باشد تا به این وسیله هزینه کمتری بدلیل هدررفتن آب به سیستم تحمیل شود. قابل ذکر است که تمایل مدل به تعویض سریعتر لوله‌ها در سناریوی ۸ با ممانعت قید اقتصادی مواجه شده و قید اقتصادی باعث تعدیل زمان تعویض لوله‌ها شده است. اما در سناریوی ۶ با وجود اعمال قید اقتصادی مدل بهینه‌سازی برای تعویض سریعتر لوله‌ها با ممانعت کمتری از طرف قید اقتصادی مواجه شده است. علت این موضوع کاهش شدت تاثیرگذاری قید اقتصادی بر مدل بهینه‌سازی در اثر اعمال قید هیدرولیکی بوده است؛ زیرا با اعمال قید هیدرولیکی متوسط قطر لوله‌های شبکه کاهش پیدا کرده و از این رو امکان تعویض لوله‌ها در یک بازه زمانی کوچکتر فراهم شده است. همچنین مقایسه نتایج سناریوهای ۲ تا ۵ نشان می‌دهد که اعمال قید هیدرولیکی در سناریوی ۳ باعث کاهش هزینه کل در مقایسه با سه سناریوی دیگر شده است. بیشترین هزینه کل نیز مربوط به سناریوی ۲ است که علت آن در نظر گرفته شدن هزینه آب هدررفته در این سناریو است. میانگین زمان بهینه تعویض

the replacement of water mains,” *Water Resources Planning and Management*, 132(2), pp. 79–88.

Luong, H. T., and Nagarur, N. N. (2001), “Optimal replacement policy for single pipes in water distribution networks,” *Water Resources Research*, 37(12), pp. 3285–3293.

Ramos, W.L. (1985). “Benefit / cost analysis procedure for determining water main replacement.” *Proceedings of the National Conference of American Water Works Association*. Denver. Colorado. pp. 1–13.

Shamir, U., and Howard, C.D.D. (1979), “An analytical approach to scheduling pipe replacement,” *American Water Works Association*, 71, pp. 248–258.

Tabesh, M., and Saber, H. (2012), “A prioritization model for rehabilitation of water distribution networks using GIS,” *Water Resources Management*, 26, pp. 225–241.

هزینه آب هدررفته، مدل بهینه‌سازی تمایل به تعویض سریعتر لوله‌ها داشته و هزینه کل بازسازی افزایش می‌یابد. همچنین در نظر گرفتن گروهبندی تعویض برای لوله‌های شبکه که وجود آن از نظر عملی و اجرایی حائز اهمیت است، باعث افزایش هزینه‌ها می‌شود؛ چرا که در این حالت مدل ناچار است تا زمان تعویض تعدادی از لوله‌ها را از حالت بهینه مطلق خارج و به سمت زمان مشخصی جابجا کند که این امر باعث افزایش هزینه کل می‌شود.

۵- مراجع

Dandy, G.C., and Engelhardt, M. (2001), “Optimal scheduling of water pipe replacement using genetic algorithms,” *Water Resources Planning and Management*, 127(4), pp. 214–223.

Dandy, G.C., and Engelhardt, M. (2006), “Multi-objective trade-offs between cost and reliability in