Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال دوم، شماره ۲، پاییز ۱۳۸۵
Volume 2, No. 2, Fall 2006 (IR-WRR)
۵۳-۶۶

کاهش میزان نشت در شبکه های توزیع آب شهری از طریق حداقل نمودن فشار اضافی در شبکه

مسعود تابش[۱] و محمد مسعود واسطی[۲]

چکیده

نظر به رشد جمعیت و بحران منابع آب در بخش وسیعی از کشورهای دنیا، مقوله نشت در شبکه‌های آبرسانی شهری اهمیت زیادی یافته است. در سالیان اخیر راهکارهای مختلفی که منجر به کاهش نشت می گردند مورد توجه محققین و مدیران صنعت آب قرار گرفته است. مدیریت فشار یکی از کاراترین و مقرون به صرفه‌ترین روشهای کاهش نشت می‌باشد. مقاله حاضر روشی را جهت کاهش نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری از طریق کمینه نمودن مجموع مربعات فشار اضافی در گره‌های شبکه ارائه می دهد. بدین منظور با نصب شیرهای فشار شکن در نقاط مناسب و بهینه نمودن مقدار فشار خروجی اینگونه شیرآلات، فشار تک تک گره‌های شبکه به حداقل مقدار ممکن در محدوده استاندارد، کاهش می‌یابد. به منظور مدل کردن مصرف و نشت در شبکه از روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار استفاده شده که بر اساس روابط دبی- فشار معرفی شده، مقدار جریان خروجی در گره‌ها (مصرف و نشت) با تغییرات فشار مرتبط می‌گردد. در پایان با ارائه یک مثال نمونه، کارائی روش ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس این روش با محاسبه مقدار بهینه فشار خروجی فشارشکن‌ها، حداقل فشار ممکن در گره‌ها که باعث بیشترین کاهش نشت و حفظ سرویس دهی مطلوب در شبکه می‌گردد، بدست می‌آید.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، شبکه‌های توزیع آب شهری، فشار اضافی، رابطه دبی- فشار، کاهش نشت، شیر فشارشکن.

Leakage Reduction in Water Distribution Networks By Minimizing the Excess Pressure

M. Tabesh [1], M.M., Vaseti [2]

Abstract

Leakage is one of the most serious problems in water distribution networks. Limited resources of water and the increasing expenses of transport, treatment, pumping, storage and distribution of water, notify the importance of leakage reduction. Due to the direct relation between leakage and pressure, pressure management is a useful and cost effective method for leakage reduction. In this research pressure reducing valves are used to achieve this goal. An optimization procedure is applied to minimize the difference between the available head and minimum standard head at each node. Sum of square differences between the available and minimum standard heads at each node are minimized using linear and non linear programming. To analyze the hydraulic conditions of the system the head driven simulation method is used. In this method the available nodal outflows are not fixed and vary with nodal pressure fluctuations. Finally a test network, have been used to illustrate the validation of the proposed method. The results of this procedure define the PRV's outlet values. Based on these optimized values, nodal heads tend to be very close to the minimum standard values which lead to the maximum leak reduction.

Keywords: Optimization, Leak Reduction, Excess Pressure, Head-Outflow Relationship, Water Distribution Networks, Pressure Reducing Valve

۱. استادیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران
۲. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه تهران

1- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran
2- MSc. Graduate, School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

یکی از معضلاتی که همواره در طراحی شبکه های آبرسانی وجود دارد نشت در شبکه است. در هر شبکه همواره مقداری از آب تولید شده در مسیر تولید تا مصرف به هدر می رود و در اختیار مصرف کننده قرار نمی گیرد. این مسئله باعث می شود علاوه بر کاهش منابع آب قابل شرب، هزینه های سنگینی به شرکتهای آب و فاضلاب تحمیل گردد. در مواقع کمبود و محدودیت منابع آب، حساسیت مسئله بیشتر بوده و لزوم برخورد با نشت را جدی تر می سازد. مقدار نشت در شبکه ها از ۵ تا ۵۰ درصد کل آب تولیدی نیز گزارش شده است (TWGWW, 1980; Twort et al., 1994; Lai, 1991). بر اساس تجارب نگارندگان از مطالعات انجام شده در سطح کشور در ده سال گذشته، در ایران مقدار متوسط نشت از شبکه‌ها بین ۱۵ تا ۳۰ درصد می باشد. نشت در شبکه‌های آبرسانی تابع عوامل مختلفی از جمله فشار آب، قدمت لوله ها، کیفیت آب و خاک، کیفیت اجرا، کیفیت لوله ها و متعلقات، ضربه و بارهای جانبی نظیر ترافیک می باشد. راهکارهایی را که می توان جهت کاهش نشت عنوان کرد عبارتند از: یافتن مستقیم محل نشت و ترمیم آن، تعویض خطوط لوله آسیب دیده و مدیریت فشار که مورد اخیر، کاراترین و مقرون به صرفه ترین گزینه جهت نیل به این هدف است. مدیریت فشار نیز معمولا از طریق نصب مخازن و یا شیرآلات انجام می شود. در صورت نصب شیرهای قطع و وصل کنترل جریان، پارامتر کنترلی، میزان بازشدگی در محل شیر است (Germanopoulos, 1988; Jowitt and Xu, 1990; Reis et al.; 1997, Vairavamoorthy and Lumbers, 1998; Luisa et al., 1999; Araujo et al., 2003). در هنگام مدیریت فشار از طریق نصب شیرهای فشارشکن، پارامتر کنترلی میزان فشار خروجی اینگونه شیرآلات می‌باشد (Germanopoulos, 1995; Ulannicki et al., 1999). البته استفاده از شیرهای فشار شکن بعنوان گزینه برتر جهت مدیریت فشار و کاهش نشت از دیدگاه مدیران و کارشناسان با تجربه در صنعت آب معرفی شده است (Farley and Trow, 2003).

عمده مقالات منتشر شده در این زمینه از جمله (Germanopoulos, 1988; Jowitt and Xu, 1990; Reis et al.,1997; Vairavamoorthy and Lumbers, 1998; Luisa et al., 1999; Araujo et al., 2003). از شیرهای قطع و وصل جریان جهت کاهش فشار استفاده کرده اند. همچنین با توجه به رشد فناوری در کشورهای توسعه یافته، در این مقالات شیرآلات خودکار (هوشمند) که میزان تنظیم باز شدگی شیر در هر ساعت قابل برنامه ریزی و تغییر است بررسی شده اند. لازم به تذکر است که بدلیل وفور شیرهای قطع و وصل در شبکه اولا از نظر اقتصادی خودکار کردن همه شیرآلات مقرون به صرفه نیست، ثانیا بدلیل احتمال بالای تغییر تنظیم شیرها در زمانهای مختلف توسط عوامل متعدد شرکتهای آب و فاضلاب و یا احتمال بالای مدفون شدن مستمر شیرآلات، استفاده از شیرهای قطع و وصل گزینه مناسبی جهت کاهش فشار نبوده و شیرهای فشار شکن برای این کار توصیه شده اند (Farley and Trow, 2003).

در مراجعی که در رابطه با کمینه‌سازی نشت در شبکه‌های توزیع آب ارائه شده‌اند انواع توابع هدف بکار رفته‌اند از جمله: توابع خطی کمینه سازی مقدار نشت (Vairavamoorthy and Lumbers, 1998) و کمینه سازی مجموع فشار اضافی در گره‌ها (Germanopoulos, 1988) و تابع غیر خطی مجموع مربعات فشار اضافی در گره‌ها (Vairavamoorthy and Lumbers, 1998). با توجه به اینکه در تابع هدف مجموع فشار اضافی در گره ها ممکن است فشار در برخی از گره ها بیشتر و در برخی از گره ها کمتر از مقدار استاندارد گردد، این مقادیر یکدیگر را خنثی کرده و جواب صحیح بدست نمی آید. همچنین تابع هدف مجموع نشتها باعث اجبار مسئله به کاهش نشت و فشار حتی فشارهای کمتر از فشار حداقل استاندارد می گردد.

براساس جمع بندی انجام شده از توابع هدف مختلف، (Vairavamoorthy and Lumbers, 1998) استفاده از رابطه مجموع مربعات فشار اضافی در گره ها را بعنوان تابع هدف توصیه کرده اند. همچنین با توجه به نوع تابع هدف، تاکنون الگوریتم های مختلفی از قبیل برنامه‌ریزی خطی (LP)[1] (Germanopoulos, 1988)، برنامه ریزی غیر خطی (NLP)[2] (Vairavamoorthy and Lumbers, 1998) و روش الگوریتم ژنتیک (GA) (Reis et al, 1997; Araujo et al., 2003) برای حل مسئله بهینه سازی بوسیله توابع هدف ذکر شده فوق استفاده شده است. با توجه به جمع بندی انجام شده از نوع توابع هدف توسط (Vairavamoorthy and Lumbers, 1998)، استفاده از روش برنامه ریزی غیر خطی برای حل مسئله بهینه سازی توصیه شده است. از طرف دیگر در حالیکه انواع مختلف روشهای جستجو مانند الگوریتم ژنتیک هم می تواند در این بحث مورد استفاده قرار گیرد ولی اینگونه روشها بدلیل پیچیدگی بیشتر، نیاز به زمان حل بیشتری خواهند داشت که این مسئله در شبکه های واقعی بزرگ و پیچیده بیشتر نمایان خواهد شد.

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به ارتباط مستقیم نشت و فشار (Goodwin, 1980; Murrer, 1985; Bessey, 1985; May, 1994)، می توان با استفاده از فرآیند بهینه سازی و کمینه نمودن فشار اضافی گره ها، نشت در شبکه را کاهش داد. با وجود اینکه همواره سعی می گردد تا نشت در شبکه به حداقل رسانده شود اما در کاهش نشت باید این نکته را مد نظر داشت که تا جایی باید فشار و در نتیجه نشت را کاهش داد که شبکه از اهداف اولیه طراحی خود که تامین آب مورد نیاز مصرف کنندگان است عدول نکرده و به منظور کاهش نشت، فشار در نقاط مختلف شبکه از حداقل هد استاندارد (H_j^{des}) کمتر نشود. برای این منظور باید تابع هدف و قیود معرفی شده به خوبی بیانگر رابطه فشار با مصرف و نشت در شبکه باشند (Vairavamoorthy and Lumbers, 1998; Germanopoulos, 1995). برای محاسبه میزان فشار در گره ها، ابزار مناسبی جهت تحلیل هیدرولیکی شبکه مورد نیاز می باشد. از اواسط دهه هشتاد میلادی این واقعیت مورد توجه قرار گرفت که یک روش تحلیل هیدرولیکی واقعی باید علاوه بر شرایط نرمال، توانائی تحلیل رفتار شبکه در شرایط بحرانی (از جمله بروز نشت) را نیز دارا باشد. زیرا روش مرسوم تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضای ثابت (DDSM)[۳] که در اکثر نرم افزارهای موجود بکار می رود، وقتی که بدلیل ایجاد شرایط غیر نرمال، مقدار هد از هد حداقل استاندارد کمتر می شود، مقدار دبی خروجی از گره (Q_j^{avl}) را کماکان برابر مقدار ثابت تقاضای اولیه (Q_j^{req}) نشان داده و قادر به محاسبه مقدار دبی خروجی واقعی که از مقدار ثابت تقاضا کمتر است، نمی باشد. بنابراین کلیه تحقیقات در این زمینه که از روش DDSM بعنوان شبیه ساز هیدرولیکی استفاده کرده اند، از جمله (Araujo et al., 2003)، علاوه بر اینکه برای موارد بحرانی که فشار گره از فشار حداقل استاندارد کمتر می شود جواب صحیحی نمی دهند، نمی توانند بطور مستقیم نیز مقدار نشت را محاسبه کرده و اثرات کاهش فشار را بر میزان نشت نشان دهند.

نتایج تحقیقات Tabesh (1998); Gupta and Bhave (1996) نشان داد که بهترین روش تحلیل هیدرولیکی، تحلیل شبکه مبتنی بر فشار با در نظر گرفتن رابطه دبی- فشار در گره ها (HDSM)[۴] می‌باشد. در روش HDSM با در نظر گرفتن یک رابطه دبی- فشار میزان دبی قابل دسترس در هر گره متناسب با فشار هر گره بدست می آید. هرگاه فشار موجود از حداقل فشار استاندارد بیشتر باشد تمامی تقاضا در گره ارضا می شود. ولی در صورتی که بدلیل شکست لوله ها و یا افزایش تقاضا (شرایط بحرانی)، افت فشار در لوله ها زیاد و هد خروجی گره ها کاهش یابد، بطوریکه از حداقل فشار استاندارد کمتر شود، مقدار دبی خروجی قابل دسترس در هر گره از میزان تقاضای آن گره کمتر خواهد بود و اگر هد از مقدار حداقل مطلق $H_j^{\min}$ (یا تراز ارتفاعی) گره کمتر شود مقدار دبی خروجی گره برابر صفر می شود. بر اساس نوع معادله دبی- فشار انتخاب شده در روش HDSM ، توابع مختلفی برای مقدار دبی خروجی هر گره در بازه فشاری حداقل استاندارد تا حداقل مطلق معرفی شده است (Tabesh, 1998) که از جمله می توان به معادله های پر کاربرد Wagner et al. (1988) و Germanopoulos (1985) اشاره نمود. بر اساس بررسی های انجام شده توسط Tabesh (1998) معادله Germanopoulos (1985) بدلیل اینکه اگر $H_j > 0.93 H_j^{des}$ آنگاه $Q_j^{avl} = Q_j^{req}$ و اگر $H_j < 0.46 H_j^{des}$ آنگاه $Q_j^{avl} = 0$، ضعیف ترین معادله موجود و رابطه Wagner et al. (1988) بعنوان بهترین رابطه دبی- فشار معرفی شده اند.

با استفاده از تحلیل شبکه به روش مبتنی بر فشار (HDSM) می‌توان نشت در شبکه را نیز مدل نمود. تا کنون افراد مختلفی در زمینه رابطه نشت و فشار تحقیق کرده اند. در برخی از این تحقیقات مقدار کلی نشت با توجه به مقدار متوسط نشت در کل شبکه محاسبه شده است (TWGWW, 1980; May, 1994). برخی نیز با در نظر گرفتن فشار در گره‌ها و با استفاده از یک رابطه دبی - فشار، مقدار نشت را در هر گره مدل نموده اند (Germanopoulos, 1985; Vela et al. 1991) . با مدل نمودن مقدار نشت و اعمال فرآیند بهینه سازی، هد بهینه در محل شیر و مقدار نشت ناشی از آن محاسبه می‌گردد.

معدود محققینی که از شیرهای فشار شکن جهت کاهش نشت استفاده کرده اند معادله بندی و یا الگوریتم کارآئی را جهت تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (روابط دبی- فشار و نشت- فشار) و همچنین تابع هدف بهینه سازی، بکار نبرده اند. نقد این مدلها توسط Tabesh (1998) و تابش و واسطی (۱۳۸۳) ارائه شده است. در یک جمع بندی می توان اظهار داشت که یک مسئله بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری باید از یک روش ریاضی کارآمد جهت بهینه سازی تابع هدف و یک مدل هیدرولیکی تحلیل شبکه که بر مبنای رابطه دبی- فشار در گره ها، مقادیر واقعی دبی های خروجی و مقدار نشت را مشخص می‌سازد، برخوردار باشد.

با توجه به اینکه در مقالات منتشر شده به غیر از یک مورد (Germanopoulos, 1988)، در بقیه تحقیقات از شیرهای کنترل

www.SID.ir

Archive of SID

جریان هوشمند جهت کاهش فشار و نشت استفاده شده است، در این مقاله از شیرهای فشار شکن برای این منظور استفاده می شود. در مرجع مذکور برای بهینه سازی از تابع هدف خطی مجموع فشار اضافی در گره ها و در معادله بندی روش HDSM نیز از معادله دبی- فشار Germanopoulos (1985) استفاده شده است. با توجه به نقاط ضعف تابع هدف خطی و رابطه دبی- فشار Germanopoulos (1985) که قبلا مورد بحث قرار گرفت، این مدل جوابهای صحیحی تولید نمی کند. بنابراین جهت رفع نقایص اینگونه مدلها از جمله مدل Germanopoulos (1988) در این مقاله از شیرهای فشارشکن بعنوان ابزار کاهش فشار، از روش HDSM بعنوان شبیه ساز هیدرولیکی، از معادله دبی- فشار Wagner et al. (1988) (بعنوان بهترین رابطه معرفی شده موجود) و از رابطه غیر خطی بعنوان تابع هدف استفاده می شود.

۲- روش کار

برای کمینه سازی فشار اضافی گره ها در شبکه‌های آبرسانی شهری، از مدل تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار و مدل بهینه سازی استفاده گردیده که در ادامه تشریح شده اند.

۲-۱- مدل تحلیل هیدرولیکی شبکه

با توجه به برتری روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر رابطه دبی- فشار در گره ها، در این مقاله از روش HDSM استفاده شده است. در این روش رابطه دبی خروجی و فشار در گره ها بصورت زیر بیان می‌شود (Tabesh, 1998; Wagner et al., 1988):

$$if \quad H_j \geq H_j^{des} \Rightarrow Q_j^{avl} = Q_j^{req} \qquad (۱-الف)$$

$$if \quad H_j^{min} < H_j < H_j^{des} \Rightarrow Q_j^{avl} = Q_j^{req} \left(\frac{H_j - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}}\right)^{(1/n)} \qquad (۱-ب)$$

$$if \quad H_j \leq H_j^{min} \Rightarrow Q_j^{avl} = 0 \qquad (۱-ج)$$

پارامترهای بکار رفته در این معادله عبارتنداز Q_j^{avl} : دبی موجود در گره j ، Q_j^{req}: دبی تقاضا در گره j ، H_j: هد در گره j ، $H_j^{\min}$: حداقل مطلق هد در گره j و H_j^{des} حداقل هد استاندارد در گره j. n ضریبی است که بسته به وضعیت شبکه در محدوده ۱/۵ تا ۲ قرار می گیرد و در این تحقیق برابر ۲ اختیار شده است. $H_j^{\min}$ (حداقل مطلق هد در گره j) مقداری است که اگر هد در گره کوچکتر یا مساوی با آن باشد هیچ جریانی در گره وجود ندارد. این مقدار در جاهایی که اطلاعات کافی در دست نیست، معمولا با تراز ارتفاعی زمین یکسان در نظر گرفته می شود. H_j^{des} (حداقل هد استاندارد مورد نیاز طراحی) مقداری است که هد کمتر از آن توانایی ارضای نیازهای مصرف کننده را بطور کامل ندارد. حداقل فشار استاندارد در مراجع مختلف بین ۱۵ تا ۳۰ متر در نظر گرفته می شود (Tabesh, 1998 ; سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ۱۳۷۱).

مقدار نشت در هر لوله بوسیله معادله زیر بدست می آید (Germanopoulos, 1985):

$$Q_{L,ij} = C_l L_{ij} \left[0.5\left(H_i - GL_i + H_j - GL_j\right)\right]^{1.18} \qquad (۲)$$

که پارامترهای آن عبارتند از : $Q_{L,ij}$: دبی نشت در لوله ij، L_{ij}: طول لوله ij، C_l: ضریب نشت که بستگی به خصوصیات شبکه داشته و برای هر شبکه مقداری ثابت است که بر اساس تحقیقات میدانی و واسنجی مدل نشت برای هر شبکه بدست می آید، H_i : هد در گره i و GL_i: تراز ارتفاعی زمین در گره i. اساس معادله (۲) از رابطه دبی وابسته به فشار $Q = KP^n$ گرفته شده است. P معرف فشار متوسط در لوله بوده و مقدار n بر اساس تحقیقات میدانی در انگلستان برابر ۱/۱۸ و در ژاپن برابر ۱/۱۵ بدست آمده است (Tabesh, 1998).

نشت در هر لوله به نسبت مساوی به گره‌های دو سر آن تخصیص داده می شود:

$$Q_{L,j} = 0.5 \sum_{ij \in IJ_j} Q_{L,ij} \qquad (۳)$$

که در آن $Q_{L,j}$ دبی نشت در گره j و IJ_j دسته لوله های ij منتهی به گره jمی‌باشند.

برای حل شبکه از دسته معادلات هد استفاده می شود. رابطه کلی پیوستگی در گره های شبکه عبارتست از:

www.SID.ir

Archive of SID

$$F_j = \left(\sum_{ij \in IJ_j} Q_{ij}\right)_{OUT} - \left(\sum_{ij \in IJ_j} Q_{ij}\right)_{IN} + Q_j + 0.5 \sum_{ij \in IJ_j} Q_{L,ij} = 0 \quad \forall\ j = 1,...,NJ \qquad (۴)$$

که در آن F_j: معادله پیوستگی در گره j، $\left(\sum_{ij \in IJ_j} Q_{ij}\right)_{OUT}$ مجموع جریانات خروجی از گره j، $\left(\sum_{ij \in IJ_j} Q_{ij}\right)_{IN}$ مجموع جریانات ورودی به گره j، Q_j: دبی تقاضا در گره j و $Q_{L,ij}$: دبی نشت در لوله ij و NJ تعداد گره های فشاری در شبکه می‌باشند.

برای حل معادله (۴) از روش نیوتن رافسون، بدلیل همگرائی خوب آن استفاده می شود. با استفاده از رابطه هیزن – ویلیامز (Jeppson, 1976) برای تعیین افت فشار در لوله ها و معادله های (۱) تا (۳)، معادله (۴) به صورت زیر نوشته می شود:

$$F_j = \sum_{i=1}^{NJ} \left(\frac{|H_i - H_j|}{K_{ij}}\right)^{0.54} Sgn(H_i - H_j) + Q_j^{req}\left(\frac{H_j - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}}\right)^{0.5} + 0.5 \sum_{ij \in IJ_j} C_l L_{ij}\left(\frac{H_i - GL_i + H_j - GL_j}{2}\right)^{1.18} = 0 \qquad (۵)$$

که در آن K_{ij}:ضریب مقاومت لوله ij و $Sgn(H_i - H_j)$ تابع علامت می باشند. در صورت وجود شیر فشار شکن در شبکه، دبی در لوله ij عبارتند از:

(۶-الف)

$$Q_{ij} = \left(\frac{|H_{PRV} - H_j|}{K_{ij}}\right)^{\left(\frac{1}{n}\right)} \quad ; if \quad H_j \le H_{PRV} \le H_i$$

(۶-ب)

$$Q_{ij} = \left(\frac{H_i - H_j}{K_{ij}}\right)^{\left(\frac{1}{n}\right)} \quad ; if \quad H_j < H_i < H_{PRV}$$

$$Q_{ij} = 0 \quad ; if \quad H_j \ge H_{PRV} \qquad (۶\text{-ج})$$

که در آن Q_{ij} دبی در لوله ij و H_{PRV} هد خروجی شیر فشار شکن می‌باشند. همانگونه که مشاهده می‌شود دبی در لوله حاوی شیر فشارشکن تابعی از هد در محل شیر و دو سر لوله است.

برای مدلسازی هیدرولیکی به روش HDSM برنامه ای در محیط نرم افزار MATLAB 6.1 تهیه شده که مقادیر دبی خروجی (مصرف و نشت) در هر گره را براساس معادله‌های (۱) تا (۶) محاسبه می کند.

۲-۲- مدل بهینه سازی

ساده ترین تابع هدف که مجموع فشار اضافی در گره های شبکه است بصورت زیر بیان می شود:

$$Minimize \quad F = \sum_{i=1}^{NJ} (H_i - H_i^{des}) \qquad (۷)$$

که در آن H_i^{des}: حداقل هد استاندارد در گره i وNJ: تعداد گره‌های فشاری در شبکه می باشند. قیود مسئله بصورت مساوی و نامساوی هستند. قیود مساوی همان معادله پیوستگی در گره های شبکه (معادله ۵) و قیود نامساوی عبارتند از:

$$H_j \prec H_{PRV} \prec H_i \qquad (۸)$$

$$H_i \ge H_i^{des} \qquad (۹)$$

معادله (۷) تابع هدفی خطی می باشد. برای اینکه این تابع در گره‌های مختلف شبکه هیچگاه به مقادیر منفی نرسد قید (۹) اعمال می‌شود. می توان برای جلوگیری از منفی شدن تابع هدف و همچنین بالا رفتن سرعت همگرائی، بجای معادله خطی (۷) از معادله غیر خطی زیر استفاده کرد:

$$Minimize \quad F = \sum_{i=1}^{NJ} (H_i - H_i^{des})^2 \qquad (۱۰)$$

با توجه به مزیتهای برنامه ریزی غیر خطی نسبت به روشهای برنامه‌ریزی خطی و همچنین سرعت همگرائی بالاتر، در این مقاله از برنامه ریزی غیر خطی به روش حداقل مربعات استفاده می شود. برای مدل کردن تابع هدف (۱۰) و قیود آن جعبه ابزار بهینه سازی در نرم افزار MATLAB 6.1 مورد استفاده قرار گرفته که در آن یک مسئله شماتیک بهینه سازی بـه روش حداقل مربعات (LSP)[5] بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\min \|C.x - d\|^2 \qquad (۱۱)$$

Subject to:

$$A.x \le b \qquad (۱۲)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$A_{eq}.x = b_{eq} \quad (۱۳)$$

$$lb \le x \le ub \quad (۱۴)$$

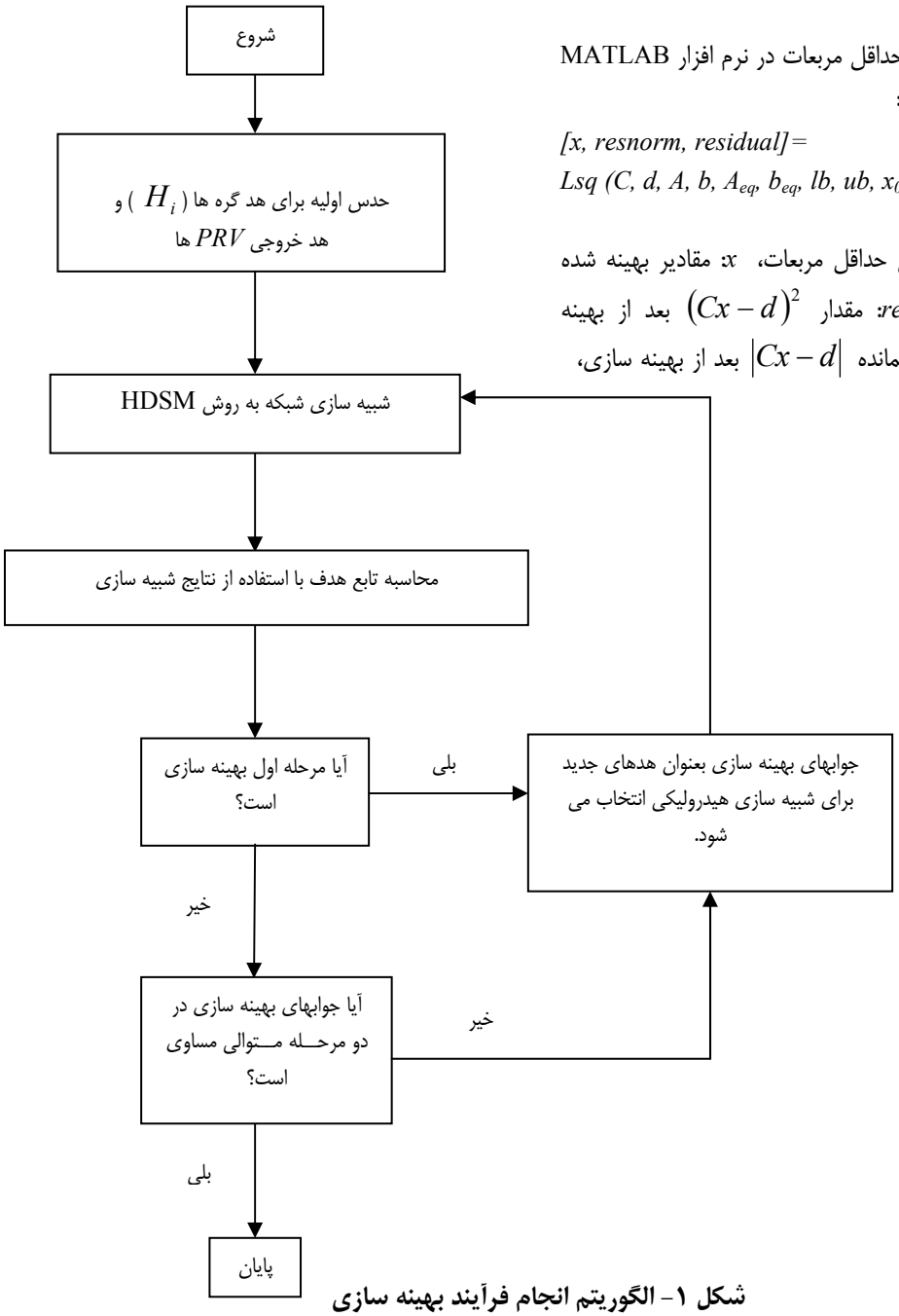
که در آنها پارامترهای شماتیک A, A_{eq} و C ماتریس و b, b_{eq}, lb, ub و d بردار می‌باشند. معادله (۱۱) تابع هدف مسئله و معادله های (۱۲) و (۱۳) بترتیب قیود مساوی و نامساوی مسئله را بیان می‌کنند. معادله (۱۴) نیز حدود بالایی و پایینی تغییرات متغیرهای طراحی را کنترل می‌کند.

جهت بهینه سازی به روش حداقل مربعات در نرم افزار MATLAB از رابطه زیر استفاده می شود:

$$[x, resnorm, residual] = Lsq\ (C, d, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub, x_0, options) \quad (۱۵)$$

که در آن Lsq معرف روش حداقل مربعات، x: مقادیر بهینه شده متغیرهای طراحی، $resnorm$: مقدار $(Cx-d)^2$ بعد از بهینه سازی، $residual$: مقدار باقیمانده $|Cx-d|$ بعد از بهینه سازی، x_0: مقادیر اولیه متغیرهای طراحی و $options$: پارامتری است که می‌توان بوسیله آن در ساختار روش بهینه سازی تغییراتی ایجاد کرد.

روند بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری با در نظر گرفتن رابطه دبی- فشار در گره ها و وجود شیرهای فشار شکن در لوله ها بصورت الگوریتم بیان شده در شکل ۱ خلاصه می شود.



شکل ۱- الگوریتم انجام فرآیند بهینه سازی

www.SID.ir

Archive of SID

جهت کمک به مدیریت مناسب تر شبکه می توان معادله (۹) را به صورت زیر بیان نمود:

$$H_i^{des} - \varepsilon \le H_i \le H_i^{\max} \qquad (۱۶)$$

که در آن $H_i^{\max}$: حداکثر مقدار هد در گره i است و ε : مقدار انحراف قید فشار از حداقل فشار طراحی در گره های هدف است که یک پارامتر مدیریتی می باشد. مقدار حداکثر فشار استاندارد معمولا برابر ۵۰ تا ۷۰ متر در نظر گرفته می شود (سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ۱۳۷۱). دلیل انتخاب پارامتر مدیریتی ε این است که در طی فرآیند بهینه سازی و کاهش فشار امکان دارد گره‌های محدودی در شبکه سریعا به مقدار حداقل فشار نزدیک شوند در حالیکه در سایر گره‌ها هنوز مقدار زیادی اضافه فشار وجود داشته باشد. به همین منظور مدیر شبکه می تواند اجازه دهد فشار در گره‌های محدودی به اندازه ε از حداقل فشار استاندارد کمتر شود. در مقابل در تعداد زیادی از گره‌های شبکه قسمت بیشتری از فشار اضافی کاهش یافته و هد آن گره ها به هد طراحی نزدیکتر می‌شوند.

۳ - ارزیابی روش

جهت ارزیابی نتایج حاصل از این پژوهش، شبکه شکل ۲ که در تحقیقات متعددی از جمله (Jowitt, and Xu, 1990; Reis et al., 1997; Vairavamoorthy and Lumbers, 1998; Luisa et al., 1999; Araujo et al., 2003) استفاده شده است انتخاب گردید. مشخصات لوله های شبکه در جدول ۱ نشان داده شده است.

تابع هدف و قیود مسئله به شرح زیر می باشند:

$$Minimize \quad F = \sum_{i=1}^{22} \left(H_i - H_i^{des}\right)^2 \qquad (۱۷)$$

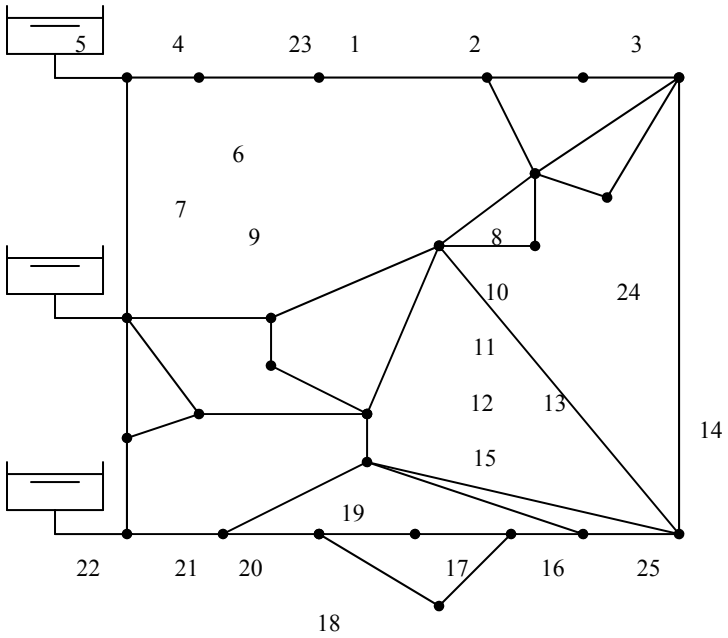
Subject to:

$$\begin{cases} H_{12} \le H_{PRV1} \le H_{13} \\ H_{15} \le H_{PRV2} \le H_{12} \\ H_{21} \le H_{PRV3} \le H_{22} \end{cases} \qquad (۱۸)$$

$$\left(\sum_{ij \in IJ_j} Q_{ij}\right)_{OUT} - \left(\sum_{ij \in IJ_j} Q_{ij}\right)_{IN} + Q_j + 0.5 \sum_{ij \in IJ_j} Q_{L,ij} = 0 \qquad \forall\ j = 1,...,22 \qquad (۱۹)$$

$$H_i^{des} - \varepsilon \le H_i \le H_i^{\min} + 60 \qquad (۲۰)$$

معادله (۱۷) تابع هدفی غیرخطی بوده که جهت کمینه نمودن آن از برنامه ریزی غیر خطی به روش حداقل مربعات استفاده می شود.



شکل ۲- ساختار شبکه مثال نمونه شامل گره ها، لوله ها و مخازن (اقتباس از Vairavamoorthy and Lumbers, 1998).

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- اطلاعات ورودی مربوط به لوله‌ها

شماره لوله	گره ابتدا	گره انتها	D (mm)	L (m)	C_{HW}
1	23	1	457	606	110
2	23	24	457	454	110
3	24	14	229	2782	105
4	25	14	381	304	135
5	10	24	305	3383	100
6	13	24	475	1767	110
7	14	13	381	1014	135
8	16	25	381	1097	6
9	2	1	457	1930	110
10	3	2	305	5150	10
11	12	13	457	762	110
12	15	16	229	914	125
13	17	16	305	822	140
14	18	17	152	411	100
15	20	18	229	701	110
16	19	17	229	1072	135
17	20	19	152	864	90
18	21	20	152	711	90
19	21	15	152	832	90
20	22	15	152	2334	100
21	12	15	229	1996	95
22	11	12	229	777	90
23	10	11	229	542	90
24	8	12	457	1600	110
25	8	10	305	249	105
26	9	8	229	443	90
27	6	8	381	743	110
28	22	8	229	931	125
29	22	21	152	2689	100
30	4	3	152	326	100
31	5	4	229	844	110
32	6	3	152	1274	100
33	5	6	229	1115	90
34	7	6	381	615	110
35	5	22	152	1408	100
36	5	7	381	500	110
37	6	9	229	300	90

که D، L و C_{HW} به ترتیب معرف قطر، طول و ضریب هیزن ویلیامز هر لوله می باشند.

در جدول ۲ نتایج حاصل از تحلیل هیدرولیکی به روش HDSM برای شرایط اولیه (بدون شیر فشارشکن) ارائه شده است. با استفاده از نتایج این جدول دیده می شود که کلیه گره های شبکه در شرایط نرمال قرار دارند، زیرا مقدار فشار موجود از حداقل فشار استاندارد بیشتر بوده و بنابراین کلیه دبیهای تقاضا در گره ها ارضا می شوند، یعنی $Q^{avl} = Q^{req}$. جدول ۲ نشان می دهد که در همه گره ها اضافه فشار در شبکه وجود دارد که خود عاملی برای افزایش نشت در شبکه می باشد. حداقل اضافه فشار مقدار ۵/۰۹ متر در گره ۱۴ و حداکثر آن ۱۲/۳۶ متر در گره ۲۰ می باشد.

در مرحله بعد جهت کاهش فشار اضافی در گره ها، از شیرهای فشارشکن استفاده می شود. از آنجا که در شبکه اصلی شکل ۲ روی

www.SID.ir

Archive of SID

لوله های ۱۱، ۲۱ و ۲۹ شیر کنترل جریان قرار دارد، در گام بعدی با قرار دادن شیر فشار شکن در لوله های ۱۱، ۲۱ و ۲۹ و اجرای برنامه بهینه سازی، هد بهینه در محل این شیرها که بترتیب با گره های شماره ۲۶، ۲۷ و۲۸ مشخص شده اند بدست می آیند. قابل ذکر است بدلیل اینکه در مراجعی که از این شبکه نمونه استفاده کرده اند در این لوله ها شیر قطع و وصل نصب شده، نتایج آنها با نتایج بدست آمده در این مقاله قابل مقایسه نمی باشد. در جدول ۳ نتایج حاصل از بهینه سازی به ازای $\varepsilon = 0\,\mathrm{m}$ ارائه شده اند. هد بهینه در محل شیرهای فشار شکن به ترتیب ۵۳، ۴۵ و ۴۵ متر می‌باشد. مشاهده می شود که برنامه بهینه سازی حتی المقدور مقدار فشار اضافی در گره ها را کاهش داده و هد گره ها را به هد حداقل استاندارد نزدیک کرده است.

برای مشاهده صحت روند بهینه سازی و اینکه نشان داده شود در صورت کاهش بیشتر فشار خروجی فشار شکنها، هد تعدادی از گره‌ها از حداقل مقدار استاندارد کمتر می گردد، علاوه بر هدهای بهینه بدست آمده برای فشارشکنها، پنج سری هد فرضی (کوچکتر از هدهای بهینه) فرض شده و روند تحلیل هیدرولیکی شبکه تکرار شده است. شکل ۳ نشان می دهد که از بین شش سری سناریوی مختلف که در آنها شش سری هد خروجی برای شیـرهای فشار شکن در نظر گرفته شده، تنها هدهای بهینه هستند که منجر به کمترین مقدار برای اضافه فشار ($H\text{-}H^{des}$) می شوند. شکل ۴ مقدار نشت در شبکه به ازای سناریوهای ارائه شده در شکل ۳ (یعنی در نظر گرفتن شش دسته هد برای فشارشکنها) را نشان می دهد. مشاهده می گردد که نشت کلی در سیستم به ازای هدهای بهینه بدست آمده، لزوما کمترین مقدار ممکن نبوده و هدهای دیگری به ازای عدم ارضای حد پایین هدها (حداقل هد استاندارد H^{des}) نشت کمتری را نشان می دهند. تابع هدف معرفی شده به نحوی است که هد در گره ها به حداقل مقدار استاندارد نزدیک شده و اختلاف آن دو به حداقل ممکن می رسد. بدین جهت هدهای بهینه ۵۳، ۴۵ و ۴۵ متر برای شیرهای فشار شکن بیشترین کاهش فشار مطلوب را نشان می دهد ولی هدهای بهینه ۲۰، ۲۰ و ۲۰ متر در عین ایجاد کمترین مقدار نشت، بیشترین کمبود فشار و در نتیجه بالاترین مقدار تابع هدف را باعث می شود.

جدول ۲- نتایج حاصل از تحلیل هیدرولیکی شبکه به روش HDSM

شماره گره	$Q^{req}\ (m^3/s)$	$Q^{avl}\ (m^3/s)$	$H^{\min}(m)$	$H^{des}(m)$	$H\ (m)$	$(m)\ H\text{-}H^{des}$
1	-0.005	-0.005	18.0	48.0	55.474	7.474
2	-0.01	-0.010	18.0	48.00	55.430	7.430
3	0.000	0.000	14.0	44.00	52.412	8.412
4	-0.005	-0.005	12.0	42.00	52.217	10.217
5	-0.030	-0.030	14.0	44.00	52.229	8.229
6	-0.010	-0.010	15.0	45.00	52.541	7.541
7	0.000	0.000	14.5	44.50	52.370	7.870
8	-0.020	-0.020	15.0	44.00	52.888	8.888
9	0.000	0.000	14.5	44.00	52.681	8.681
10	-0.005	-0.005	14.0	45.00	53.009	8.009
11	-0.010	-0.010	14.0	42.00	53.035	11.035
12	0.000	0.000	15.0	45.00	53.806	8.806
13	0.000	0.000	23.0	53.00	54.690	11.690
14	-0.005	-0.005	20.0	50.00	55.095	5.095
15	-0.020	-0.020	8.0	38.00	49.610	11.610
16	0.000	0.000	10.0	40.00	49.601	9.601
17	0.000	0.000	7.0	37.00	49.550	12.550
18	-0.005	-0.005	8.0	38.00	49.351	11.351
19	-0.005	-0.005	10.0	40.00	49.420	9.420
20	0.000	0.000	7.0	37.00	49.364	12.364
21	-0.005	-0.005	10.0	40.00	49.399	9.399
22	-0.02	-0.020	15.0	45.00	51.219	6.219
23	0.000	0.000	0.0	55.50	55.500	-
24	0.000	0.000	0.0	55.25	55.250	-
25	0.000	0.000	0.0	55.25	55.250	-

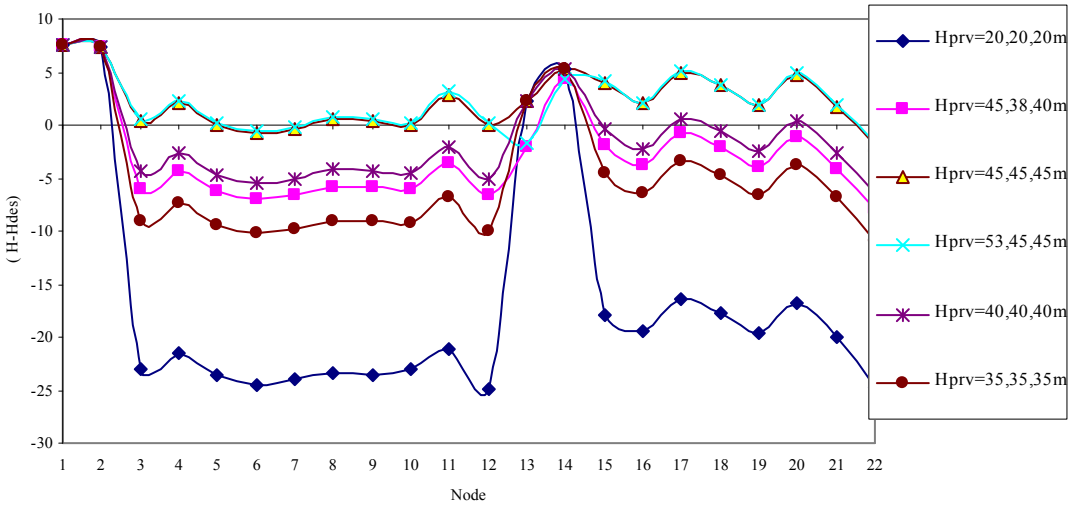
www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳- اطلاعات خروجی مربوط به جواب بهینه برای $(\varepsilon = 0m)$.

شماره گره	$H\ (m)$	$H^{\min}(m)$	$H^{des}(m)$	$Q^{avl}\ (m^3/s)$
1	55.466	18.0	48.00	-0.005
2	55.407	18.0	48.00	-0.010
3	44.489	14.0	44.00	0.000
4	44.194	12.0	42.00	-0.005
5	44.196	14.0	44.00	-0.030
6	44.489	15.0	45.00	-0.00995
7	44.327	14.5	44.5.00	0.000
8	44.803	15.0	44.00	-0.020
9	44.618	14.5	44.00	0.000
10	45.244	14.0	45.00	-0.005
11	45.109	14.0	42.00	-0.010
12	45.210	15.0	45.00	0.000
13	51.327	23.0	53.00	0.000
14	54.371	20.0	50.00	-0.005
15	42.064	8.0	38.00	-0.020
16	42.092	10.0	40.00	0.000
17	42.038	7.0	37.00	0.000
18	41.813	8.0	38.00	-0.005
19	41.900	10.0	40.00	-0.005
20	41.824	7.0	37.00	0.000
21	41.837	10.0	40.00	-0.005
22	43.296	15.0	45.00	-0.01943
23	55.500	0.0	55.50	0.000
24	55.250	0.0	55.25	0.000
25	55.250	0.0	55.25	0.000
26*	52.998	0.0	45.00	0.000
27*	44.996	0.0	38.00	0.000
28*	44.994	0.0	40.00	0.000

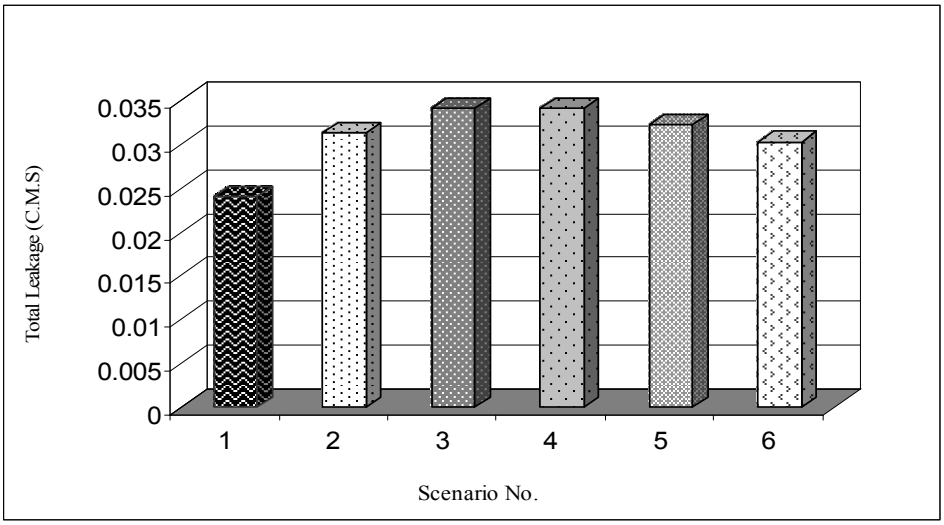
* گره های ۲۶ تا ۲۸ محل خروجی فشار شکنها می باشند.



شکل ۳ - فشار اضافی در هر گره (بر حسب متر) به ازای سناریوهای مختلف هد در شیرهای فشار شکن.

www.SID.ir

Archive of SID

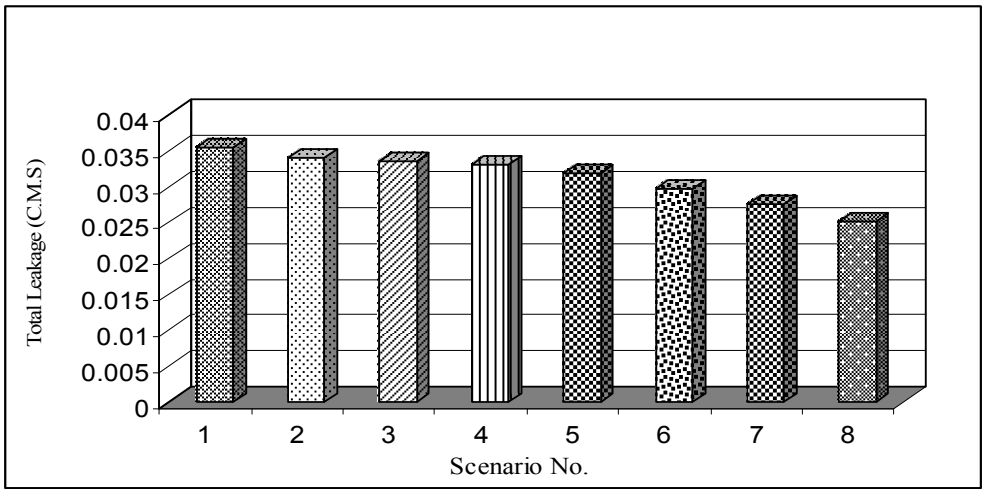


شکل ٤- نشت کل در شبکه ناشی از سناریوهای مختلف هد در شیرهای فشار شکن.
1) H_{PRV} = 20, 20, 20 m; 2) H_{PRV} = 45, 38, 40 m; 3) H_{PRV} = 45, 45, 45 m; 4) H_{PRV} = 53, 45, 45 m; 5) H_{PRV} = 40, 40, 40 m; 6) H_{PRV} = 35, 35, 35 m

در بعضی از شرایط ممکن است طراح یا مدیر شبکه بنا به دید مهندسی خود اجازه دهد تابع هدف از مقدار حقیقی خود تجاوز نماید. این مهم با در نظر گرفتن مقدار پارامتر ε انجام می شود. در این تحقیق برای اینکه اختلافات بخوبی نشان داده شوند با مقادیر مختلف $\varepsilon \in [0,1,2,5,10,15,20,25]$ (متر) بهینه سازی انجام شده است. در جدول ۴ مقدار هد در گره های شبکه بازای $\varepsilon = 5\,\mathrm{m}$ مشاهده می گردد. شکلهای ۵ و ۶ بترتیب تغییرات نشت و تابع هدف را به ازای مقادیر مختلف ε نشان می دهند. با دقت در این شکلها می توان دریافت هر اندازه ε بزرگتر شود مقدار کلی نشت کمتر ولی در عوض مقدار نهایی تابع هدف به مراتب بزرگتر می شود.

ε یک پارامتر مدیریتی بود و بنا به نظر طراح شبکه انتخاب می‌شود اما مقادیر $\varepsilon \succ 5\,\mathrm{m}$ معمولا توصیه نمی‌شود (Vairavamoorthy and Lumbers, 1998).

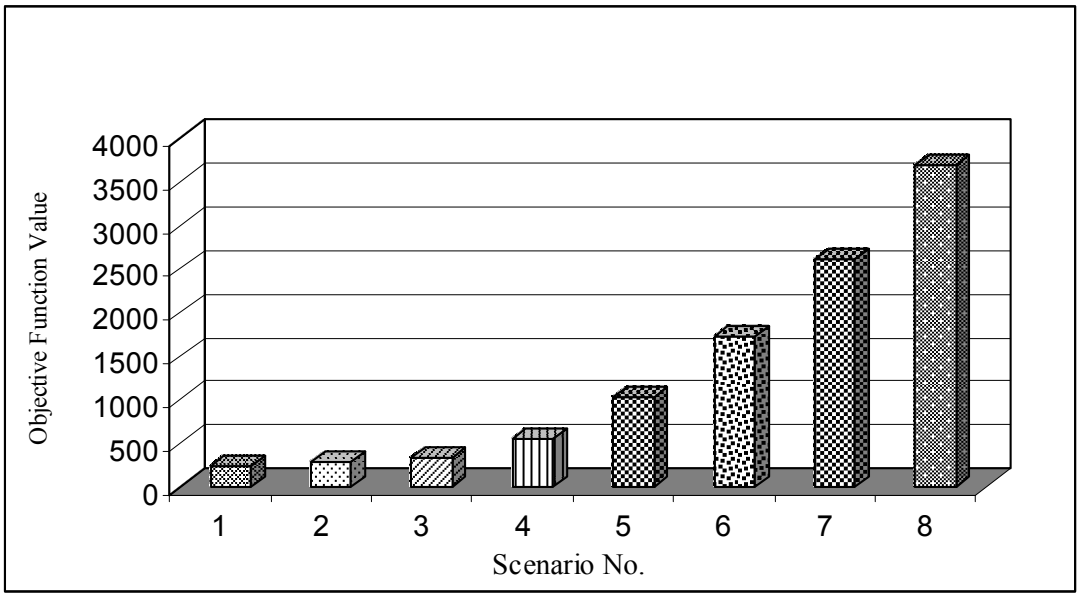
روند عملکرد بهینه سازی و نقش پارامتر مدیریتی ε در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می شود که در ابتدا (حالت بدون فشارشکن) حداکثر اضافه فشار در گره ها وجود دارد. در حالت وجود شیرفشارشکن و تعیین هدهای خروجی بهینه شیرها در طی روند بهینه سازی، حداقل اضافه فشار در گره ها ایجاد شده است که طبیعتا میزان نشت را نیز کاهش می دهد.



شکل ۵ - تغییرات نشت سیستم در حالات مختلف بهینه سازی
1) no PRV; 2) ε = 0 m; 3) ε = 1 m; 4) ε = 2 m; 5) ε = 5 m; 6) ε = 10 m; 7) ε = 15 m; 8) ε = 20 m

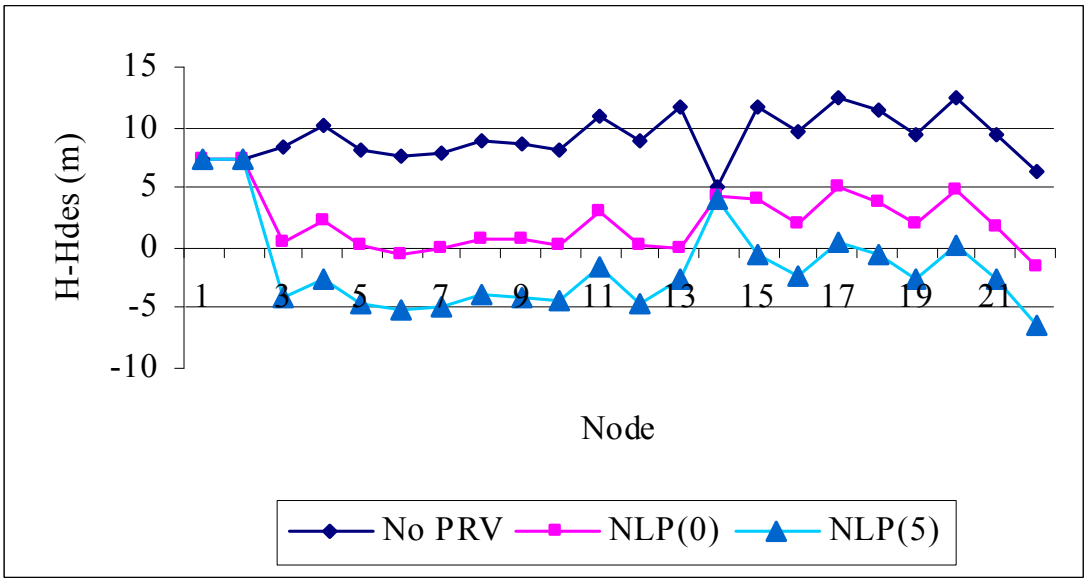
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٦ - مقدار تابع هدف در حالات مختلف بهینه سازی

1) no PRV; 2) $\varepsilon = 0$ m; 3) $\varepsilon = 1$ m; 4) $\varepsilon = 2$ m; 5) $\varepsilon = 5$ m; 6) $\varepsilon = 10$ m; 7) $\varepsilon = 15$ m; 8) $\varepsilon = 20$ m



شکل ۷- مقدار فشار اضافی در هر گره به ازای سناریوهای بدون شیر فشارشکن (No PRV)، شیر فشارشکن با $\varepsilon = 0$ m (NLP(0)) و $\varepsilon = 5$ m (NLP(5)).

در گره های ۳ تا ۱۳ اضافه فشار به حداقل ممکن رسیده در حالیکه در گره های ۱۴ تا ۲۱ هنوز مقداری اضافه فشار وجود دارد. برای حالت $\varepsilon = 5$ m نیز مشاهده می شود اضافه فشار در گره های ۱۵ تا ۲۱ کاسته شده و به حداقل ممکن رسیده ولی به موازات آن فشار در گره های ۳ تا ۱۳ از مقدار فشار حداقل استاندارد کمتر شده است. در این حالت فشار در گره ها و در نتیجه نشت نیز کمتر از حالت بهینه شده است. همچنین در گره های ۱، ۲ و ۱۴ که در بالا دست شیرهای فشارشکن و بلافاصله در پایین دست مخازن با هد ثابت قرار دارند کمترین مقدار کاهش فشار اتفاق افتاده است که از نظر منطقی نیز قابل توجیه می باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٤ - اطلاعات خروجی مربوط به جواب بهینه برای $(\varepsilon = 5m)$.

شماره گره	$H(m)$	$Q^{avl}\ (m^3/s)$
1	55.463	-0.005
2	55.396	-0.010
3	39.772	0.000
4	39.447	-0.0042
5	39.448	-0.023
6	39.737	-0.00795
7	39.577	0.000
8	40.038	-0.017
9	39.860	0.000
10	40.647	-0.004
11	40.298	-0.009
12	40.299	0.000
13	50.318	0.000
14	54.149	-0.005
15	37.551	-0.0195
16	37.623	0.000
17	37.565	0.000
18	37.319	-0.0049
19	37.422	-0.00482
20	37.328	0.000
21	37.330	-0.0048
22	38.588	-0.0184
23	55.500	0.000
24	55.250	0.000
25	55.250	0.000
26	47.998	0.000
27	39.996	0.000
28	39.994	0.000
28	39.994	0.000

٤- جمع بندی و نتیجه گیری

مدیریت فشار یکی از کاراترین و مقرون به صرفه ترین روش ها جهت کاهش نشت در شبکه های توزیع آب شهری می باشد. با توجه به رابطه مستقیم نشت و فشار در شبکه آب می‌توان با مدیریت فشار عملا نشت در شبکه را کنترل کرد. استفاده از شیرهای فشار شکن بهترین روش کاهش فشار می‌باشد. با فرض مشخص بودن محل شیرهای فشارشکن برای تنظیم هد خروجی این شیرها، از روش بهینه سازی استفاده شده است. با استفاده از یک تابع هدف غیر خطی با حداقل نمودن فشار اضافی در گره‌ها مقدار نشت شبکه به حداقل خود کاهش می یابد، در حالیکه فشار لازم جهت تامین آب مورد نیاز مصرف کننده ایجاد می‌گردد. جهت تحلیل هیدرولیکی شبکه از روش مبتنی بر فشار (HDSM) و بهترین رابطه دبی – فشار موجود استفاده شده است که به خوبی قادر به محاسبه میزان نشت، بدلیل ایجاد ارتباط بین فشار و دبی خروجی در گره‌ها می‌باشد.

٥- تشکر

به این وسیله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه تهران که پشتیبانی مالی این پژوهش را در قالب طرح پژوهشی به شماره ۶۱۴/۲/۸۶۸ تقبل نمودند تقدیر و تشکر می گردد.

پی‌نوشت‌ها

1. Linear Programming
2. Non Linear Programming
3. Demand Driven Simulation Method
4. Head Driven Simulation Method
5. Least Squares Programming

٦- مراجع

تابش، م.، واسطی، م.م.، (۱۳۸۳)، "مقایسه فرمولهای دبی – فشار برای تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار در شبکه‌های توزیع آب شهری"، مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی منابع آب ایران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ایران، ۸ صفحه.

سازمان مدیریت و برنامه ریزی، دفتر تحقیقات و معیارهای فنی و وزارت نیرو، استاندارد مهندسی آب، (۱۳۷۱)، "مبانی و ضوابط طراحی طرحهای آبرسانی شهری، نشریه ۳-۱۱۷ "، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی.

Araujo, L.S., Ramos, H.M. and Coelho, S.T., (2003), "Optimization of the use of valves in a network water distribution system for leakage minimization", Advances in Water Supply Management, (Maksimovic, Butler, Memon), eds., Swets & Zeitlinger, Lisse.

Bessey, S.G., (1985), "Some development in pressure reduction", *J. Inst. Water Engineering Science,* 39(6), pp. 501-505.

Farley, M., and Trow, S., (2003), *Losses in water distribution networks*, IWA Publishing.

Germanopoulos, G., (1988), "Modeling and operational control of water supply networks", *Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering*, Imperial College of Science and Technology, University of London, UK.

Germanopoulos, G., (1985), "A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models", *Civil Engineering Systems*, 2, September, pp.171-179.

Germanopoulos, G., (1995), "Valve control regulation for reducing leakage", *Improving Efficiency and*

www.SID.ir

Archive of SID

networks by genetic algorithm", *J. Water Resources Planning and Management*, *ASCE*, 123(6), pp. 317-326.

Tabesh, M., (1998), *Implications of the pressure dependency of outflows on data management, mathematical modeling and reliability assessment of water distribution systems*, PhD Thesis, Civil Engineering Department, University of Liverpool, UK.

TWGWW (Technical Working Group on Waste of Water), (1980), "Leakage control policy", *WRc/Water Authorities Association*, Report No. 26.

Twort, A.C., Crowley, F.W., and Rantnayaka, D.D., (1994), *Water supply*, *Edward Arnold.*

Ulannicki, B., Bounds, P.L.M., Rance, J.P., and Reynolds, L., (1999), "Open loop and closed loop pressure control for leakage reduction", *Water Industry System CCWI 99*, 1, pp. 475-486.

Vela, A., Perez, R., and Espert, V., (1991), "Incorporation of leakage in the mathematical model of a water distribution network", *Proc. 2nd Int. Conference on Computing Methods in Water Resources,* Computational Mechanics Publication, pp. 245-257.

Vairavamoorthy, K., and Lumbers, J., (1998), "Leakage reduction in water distribution systems: optimal valve control", *J. Hydraulic Engineering*, *ASCE*, 124(11), pp. 1146-1154.

Wagner, J.M., Shamir, U., and Marks, D.H., (1988), "Water distribution reliability: analytical methods", *J. Water Resources Planning and Management*, *ASCE*, 114(3), pp. 253-275.

Reliability in Water Distribution Systems, pp. 212-240.

Goodwin, S.J., (1980), "The results of the experimental program on leakage and leakage control", Technical Report TR 154, *Water Research Centre*, Swindon, UK.

Gupta, R., and Bhave, P.R., (1996), "Comparison of methods for predicting deficient network performance", *J. Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(3), pp. 214-217.

Jeppson, R. W., (1976), *Analysis of flow in pipe networks*, Ann Arbor Science Publishers, Inc.

Jowitt, P.W. and Xu, C., (1990), "Optimal valve control in water distribution networks", *J. Water Resources Planning and Management*, *ASCE*, 116(4), pp. 455-472.

Lai, C.C., (1991), "Unaccounted for water and the economics of leak detection", *Water Supply*, 9(3-4), IRI-1 – IRI-8.

Luisa, F., Reis, R., and Chaudhry, F.H., (1999), "Hydraulic characteristics of pressure reducing valves for maximum reduction of leakage in water supply networks", *Water Industry System, CCWI*, 1, pp. 259-269.

May, J., (1994), "Pressure dependent leakage", *World Water & Environmental Engineering Management*, October.

Murrer, J., (1985), "Pressure reduction as a means of reducing waste in the Milton Keynes area", *Anglian Water Authority,* Cambridge Division, Unpublished Report.

Reis, L.F.R., Porto, R.M., and Chaudhry, F.H., (1997), "Optimal location of control valves in pipe

تاریخ دریافت مقاله: ۲۶ اسفند ۱۳۸۲
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳ اردیبهشت ۱۳۸۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۲ مهر ۱۳۸۵

www.SID.ir