

بهینه سازی شبکه های آبرسانی شهری با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان و رابطه دبی - فشار در گره ها

مسعود تابش

استادیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

آرش کریم زاده

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۱/۳/۱۹، تاریخ تصویب ۸۲/۸/۱۲)

چکیده

مقاله حاضر روشی را جهت بهینه سازی شبکه های آبرسانی ارائه می دهد که علاوه بر قیود رایج در بهینه سازی شبکه ها قابلیت اطمینان گره ها و شبکه در شرایط بحرانی مثل شکست لوله ها و افزایش تقاضا در گره ها و .. را نیز بعنوان یک قید مد نظر قرار می دهد. با توجه به نوسان بودن مفهوم قابلیت اطمینان در شبکه های آبرسانی از آخرین تعریف پذیرفته شده جهانی یعنی نسبت جریان قابل دسترس خروجی به کل تقاضا استفاده گردیده است. در این تعریف طبیعت احتمالی شکست لوله ها نیز در نظر گرفته می شود. همچنین برای محاسبه میزان دقیق قابلیت اطمینان از روش تحلیل شبکه مبتنی بر فشار استفاده گردیده است. در این روش دبی خروجی در گره ها وابسته به مقدار فشار در آن گره بوده و نسبت به روش رایج تحلیل شبکه مبتنی بر ثابت بودن تقاضا در کل سیستم، نتایج بسیار واقعی تری را حاصل می نماید. برای بهینه سازی نیز از روشهای توابع جریمه خارجی، گرادیان و درونیابی درجه دوم استفاده گردیده است. در پایان با ذکر دو مثال نمونه دقت و صحت نتایج حاصل از این روش بخصوص در شرایط بحرانی ارائه می گردد. بر طبق این نتایج متناسب با افزایش فاکتور قابلیت اطمینان، قیمت شبکه نیز افزایش می یابد.

واژه های کلیدی: بهینه سازی، شبکه های توزیع آب شهری، قابلیت اطمینان، رابطه دبی-فشار

مقدمه

در استانداردها همانند حداقل و حداکثر سرعت و فشار، مثبت بودن دبی ها و ارضای روابط پیوستگی در حل مسائل بهینه سازی مورد نظر قرار می گرفت [۱-۵]. از اواسط دهه هشتاد میلادی این واقعیت مورد توجه قرار گرفت که یک مسئله بهینه سازی باید علاوه بر شرایط نرمال، رفتار شبکه در شرایط بحرانی را نیز مد نظر قرار دهد. با استفاده از مفهوم قابلیت اطمینان در شبکه های آبرسانی محققین زیادی به بررسی وضعیت شبکه در شرایط بحرانی پرداختند [از جمله ۶-۱۴]. فاکتور قابلیت اطمینان به این مهم می پردازد که در حین وقوع شرایط بحرانی در شبکه نظیر شکست لوله، خروج ناگهانی پمپ از مدار، آلودگی مخازن و منابع، مصرف افزون بر دبی طراحی و ... یک شبکه آبرسانی چه درصدی از وظایف خود که همان تامین دبی مورد نیاز تحت فشار مناسب می باشد را به انجام می رساند [۱۵]. تعریف قابلیت اطمینان در طول زمان متناسب با ویژگیهای شبکه های آبرسانی تکامل

مسئله حداقل نمودن هزینه ساخت شبکه های آبرسانی در چند دهه اخیر مد نظر بسیاری از محققین و طراحان قرار گرفته است. این امر به دو طریق بهینه سازی شکل شبکه جهت دارا بودن حداقل لوله های مورد نیاز و یا بهینه (کمینه) سازی قطر لوله های موجود در شبکه به منظور کاهش هزینه های ساخت انجام می گردد. مدل های بهینه سازی شکل شبکه به دو گروه تقسیم می شوند. دسته اول مدل های هستند که کلیه لوله های بالقوه لازم شبکه را در نظر گرفته و سپس حین ارضای قیود با حذف برخی از لوله ها هزینه را کاهش می دهند [۱-۵]. دسته دوم این مدل ها با یک شبکه شاخه ای طراحی را آغاز می نمایند و سپس با افزودن لوله هایی به شبکه سعی در ارضای قیود می نمایند [۱-۵]. در آغاز صرفا قیود عرفی شبکه های آبرسانی ذکر شده

صرفنظر از تعریف قابلیت اطمینان و روش تحلیل شبکه، روشهایی که برای بهینه سازی شبکه های آبرسانی بکار رفته اند نیز متفاوت می باشند. بطور مثال [۱] برای ساده سازی بجای اینکه قطر لوله را بعنوان متغیر در نظر بگیرند هر لوله را مرکب از چند قطعه مجزا با قطر مشخص فرض نموده و طول این قطعات را بعنوان متغیرهای بهینه سازی در نظر گرفته و با استفاده از برنامه ریزی خطی آن را حل کرده اند. این روش در عین ساده سازی حل، از نظر مهندسی واقعی نبوده و قابل قبول نمی باشد. افراد دیگری از جمله [۱۳] یک تابع قیمت غیر خطی که متغیر اصلی آن قطر می باشد را بعنوان تابع هدف کمینه ساخته اند. آنها با ارائه روشی ابتدا مقادیری را برای قطر لوله ها در نظر گرفتند بطوری که تمام قيود بهینه سازی را ارضاء نمایند. سپس یک تغییر جزئی در مقادیر قطرها در نظر گرفته شده بطوریکه حد اکثر کاهش در قیمت را ایجاد نموده و هیچ قیدی نیز نقض نگردد. در حقیقت تابع هدف غیر خطی قیمت و قيود، بصورت توابعی خطی از تغییر جزئی قطر در آمده و در نهایت مسئله با استفاده از برنامه ریزی غیر خطی حل می گردد. در این روش در عین اینکه زمان اجرا کاهش یافته است ولی باید قطرهای اولیه را طوری انتخاب نمود که هیچیک از قيود نقض نگردند که این کار بخصوص در شبکه های پیچیده مشکل آفرین خواهد بود.

در یک جمع بندی می توان اظهار داشت که یک مسئله بهینه سازی شبکه آبرسانی باید از یک روش ریاضی کارآمد جهت بهینه سازی تابع هدف، یک تعریف جامع از مفهوم قابلیت اطمینان برای ارزیابی عملکرد شبکه در وضعیت بحرانی و یک مدل تحلیل هیدرولیکی شبکه که بر مبنای رابطه دبی-فشار در گره ها مقادیر واقعی دبی های خروجی را مشخص سازد برخوردار باشد. با توجه به اینکه روشهای موجود بهینه سازی شبکه های آبرسانی فاقد یک یا چند مشخصه از موارد فوق می باشند باعث عدم دقت و صحت نتایج، کندی سرعت و یا پیچیدگی محاسبات گردیده اند. مقاله حاضر بر آنست که با در نظر گرفتن هر سه نکته فوق روش کارآمدتری را برای بهینه سازی شبکه های آبرسانی ارائه نماید.

یافته است. از جمله این تعاریف می توان به ایجاد شرائط افزونگی^۱ در سیستم با افزایش لوله ها و ایجاد حلقه در شبکه [۱۶]، محدود نمودن میزان شکستها در طی یک دوره زمانی [۷،۶]، استفاده از روشهای تحلیلی نظیر حداقل دسته های قطع شده [۷]، استفاده از مفهوم امکان کاربری اجزاء سیستم^۳ [۱۱]، بکاربردن بهینه سازی در بدست آوردن حداکثر دبی قابل دسترس [۱۰] و یا استفاده از معیارهای جانشین نظیر آنتروپی [۱۸،۱۷] اشاره نمود. بسته به نوع تعریف استفاده شده، قيود متنوعی برای فاکتور قابلیت اطمینان در مسئله بهینه سازی اعمال گردیده اند. اغلب این تعاریف با پیچیدگیهای زیادی از بعد تحلیلی و یا حل کامپیوتری همراه بوده که باعث عدم دقت کافی و زمانبر بودن محاسبات می شوند [۱۹]. در سالهای اخیر مشخص شده است که استفاده از تعریف نسبت دبی خروجی به میزان کل تقاضا در گره ها نتایج واقعی تری از فاکتور قابلیت اطمینان ارائه می نماید [۲۰،۱۹]. همچنین برخی از محققین دریافته اند که جهت یافتن میزان واقعی دبی خروجی در گره ها و در نتیجه محاسبه دقیق فاکتور قابلیت اطمینان، استفاده از روشهای رایج تحلیل هیدرولیکی شبکه که دبی خروجی از گره ها را صرفنظر از مقدار فشار در آنها ثابت فرض می کنند کارائی لازم را ندارند [۱۹]. نتایج تحقیقات [۲۱،۱۹] نشان داد که بهترین طریق یافتن مقدار واقعی دبی های خروجی از گره ها استفاده از روش تحلیل شبکه مبتنی بر رابطه دبی-فشار در گره ها می باشد که در این مقاله بعنوان **Head Driven Simulation Method** یا روش **HDSM** خوانده می شود. در این روش بین دبی خروجی و فشار در گره ها رابطه ای فرض می شود و کمیت دبی خروجی در هر گره در شرایط فشاری متفاوت توسط این رابطه محاسبه می گردد [۲۲،۱۱،۱۰-۲۷]. انواع روابط پیشنهادی دبی-فشار در گره ها به همراه مزایا و معایب هر یک توسط [۱۹] مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجه کلیه روشهای محاسبه فاکتور قابلیت اطمینان که بر مبنای استفاده از تحلیل شبکه به روش **Demand Driven Simulation Method** یا **DDSM** مبتنی باشند دارای دقت و صحت لازم در نتایج محاسبات نمی باشند.

$$F_j = \sum_{i=1}^{NJ_j} \left(\frac{|H_j - H_i|}{K_{ij}} \right)^{0.54} \text{sgn}(H_i - H_j) +$$

$$Q_j^{req} \left(\frac{H_j - H_j^{\min}}{H_j^{des} - H_j^{\min}} \right)^{0.5} = 0$$

(۲)

که در آن:

$$\text{sgn}(H_i - H_j) = 1 \quad ; H_i > H_j$$

$$\text{sgn}(H_i - H_j) = 0 \quad ; H_i = H_j$$

$$\text{sgn}(H_i - H_j) = -1 \quad ; H_i < H_j$$

و K_{ij} ضریب مقاومت لوله می باشد. جمله دوم سمت

چپ رابطه (۲) وقتی که $H_j \geq H_j^{des}$ باشد برابر Q_j^{req}

و زمانیکه $H_j \leq H_j^{\min}$ باشد برابر صفر است. NJ_j

تعداد گره هایی هستند که مستقیماً به گره j متصل

می باشند.

مدل محاسبه قابلیت اطمینان

برای بدست آوردن فاکتور قابلیت اطمینان در

شبکه های آبرسانی ابتدا پارامتری بنام پارامتر امکان

کاربری تعریف و با استفاده از آن رابطه ای برای فاکتور

قابلیت اطمینان ارائه می گردد. پارامتر امکان کاربری برای

یک جزء شبکه عبارتست از احتمال اینکه آن جزء در زمان

t دارای عملکرد مناسب و مطلوب باشد. همچنین

می توان آن را بصورت درصد زمان عملکرد مناسب آن

جزء شبکه به زمان کل عملکرد آن جزء بیان نمود. با توجه

به این تعریف، رابطه زیر برای قابلیت کاربری لوله ها (a_l)

ارائه شده است [۱۱].

$$a_l = \frac{0.21218D_l^{1.462131}}{0.00074D_l^{0.285} + 0.21218D_l^{1.462131}}$$

$$; \forall l = 1, 2, \dots, NP$$

(۳)

که در آن NP تعداد لوله ها و D_l قطر لوله l ام بر حسب

اینچ می باشد.

با استفاده از رابطه (۳) برای قابلیت اطمینان

گره های شبکه از فرمول زیر محاسبه می گردد [۲۰].

متدولوژی

برای بهینه سازی شبکه های آبرسانی با در نظر

گرفتن قیود قابلیت اطمینان و رابطه دبی-فشار در گره ها،

از تعاریف و مدل های زیر استفاده می گردد.

مدل تحلیل شبکه

با توجه به برتری روش تحلیل هیدرولیکی شبکه

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 تعریف می شود

[۲۸، ۲۵، ۱۹].

$$Q_j^{avl} = Q_j^{req} \quad ; H_j \geq H_j^{des}$$

$$Q_j^{avl} = Q_j^{req} \left(\frac{H_j - H_j^{\min}}{H_j^{des} - H_j^{\min}} \right)^{\frac{1}{n_j}} \quad ; H_j^{\min} < H_j < H_j^{des}$$

$$Q_j^{avl} = 0 \quad ; H_j \leq H_j^{\min}$$

(۱)

پارامترهای بکار رفته در این معادله عبارتند از Q_j^{avl} :

دبی خروجی در گره j ، Q_j^{req} : دبی درخواستی در گره j ؛

H_j : هد گره j ، H_j^{des} : حداقل هد مورد نیاز در گره j و

H_j^{\min} : حداقل مطلق هد در گره j . مقدار n_j نیز بین ۵

و ۱ است [۲۱، ۱۹] که در این تحقیق برابر ۲ در نظر

گرفته شده است.

حداقل هد مورد نیاز (H_j^{des}) مقداری است که اگر هد

گره از آن کمتر شد، دیگر دبی خروجی با دبی درخواستی

گره برابر نیست. مقدار این پارامتر بسته به نوع استاندارد،

مستفاوت است ولی عموماً حدود ۱۵ متر در نظر گرفته می

شود [۳۰، ۲۹]. حداقل مطلق هد (H_j^{\min}) مقداری است

که به ازای آن دبی خروجی گره صفر خواهد شد. در

صورت عدم دسترسی به داده های میدانی [۲۱] می توان

این مقدار را برابر ارتفاع توپوگرافی گره در نظر گرفت

[۱۹].

برای حل شبکه از معادلات هد و روش نیوتن رافسون،

بدلیل همگرایی خوب و کاربرد مطلوب این روش در حل

معادلات غیر خطی استفاده می گردد. سپس با استفاده از

رابطه هیزن ویلیامز و ادغام رابطه دبی-فشار گره ها در

معادلات حاکم، رابطه پیوستگی بصورت زیر توسعه

می یابد:

$$\begin{aligned}
 D^{\min} &\leq D_i \leq D^{\max} && ; \forall i \\
 H^{\min} &\leq H_j \leq H^{\max} && ; \forall j \\
 v^{\min} &\leq v_i \leq v^{\max} && ; \forall i \\
 R_s &\geq R_s^{\min} \\
 R_j &\geq R_j^{\min}
 \end{aligned}
 \tag{۶}$$

برای ترکیب قیود و تابع هدف ابتدا قیود را بدون بعد کرده و سپس به روش توابع جریمه خارجی این قیود با تابع هدف ترکیب می گردند [۳۱]. بعنوان مثال برای بدون بعد کردن قیود سرعت ماکزیمم بصورت زیر عمل می شود.

$$\begin{aligned}
 v_i &\leq v^{\max} \\
 \frac{v_i}{v^{\max}} - 1 &\leq 0
 \end{aligned}
 \tag{۷}$$

در نتیجه تابع هدف نهائی به شکل زیر تعریف می گردد [۳۱].

$$\begin{aligned}
 \phi(D, r) = & \sum_{i=1}^{NP} \gamma D_i^e L_i + r \left[\sum_{i=1}^{NP} \left[\max\left(\frac{v_i}{v^{\max}} - 1, 0\right)^2 + \max\left(1 - \frac{v_i}{v^{\min}}, 0\right)^2 \right] \right] + \\
 & r \left[\sum_{i=1}^{NP} \left[\max\left(\frac{D_i}{D^{\max}} - 1, 0\right)^2 + \max\left(1 - \frac{D_i}{D^{\min}}, 0\right)^2 \right] \right] + \\
 & r \left[\sum_{j=1}^{NJ} \left[\max\left(\frac{H_j}{H^{\max}} - 1, 0\right)^2 + \max\left(1 - \frac{H_j}{H^{\min}}, 0\right)^2 \right] \right] + \\
 & r \left[\sum_{j=1}^{NJ} \max\left(1 - \frac{R_j}{R_j^{\min}}, 0\right)^2 \right] + \\
 & r \left[\max\left(1 - \frac{R_s}{R_s^{\min}}, 0\right)^2 \right]
 \end{aligned}
 \tag{۸}$$

که در آن r ضریب توابع جریمه، NP تعداد لوله ها و NJ تعداد گره های شبکه می باشند. حال با روش گرادیان می توان این تابع جدید بدون بعد را کمینه نمود. مقدار گرادیان تابع (۸) به صورت زیر بیان میشود.

$$\begin{aligned}
 R_j &= \frac{1}{Q_j^{req}} \left(\sum_{l=0}^{NP} P(l) Q_j^{avl}(l) \right) \\
 &= P(0) \left(r_j(0) + \sum_{l=1}^{NP} r_j(l) \frac{ua_l}{a_l} \right) ; \forall j
 \end{aligned}
 \tag{۴}$$

که در آن:

$$r_j(M) = \frac{Q_j^{avl}(M)}{Q_j^{req}} \quad M = 0, \dots, NP ; \forall j$$

$$P(0) = \prod_{l=1}^{NP} a_l$$

$$P(M) = P(0) \prod_{l=1}^M \frac{ua_l}{a_l} \quad M = 1, \dots, NP$$

در این روابط قابلیت اطمینان در گره j ، $P(l)$ احتمال شکست لوله l ، $r_j(l)$ راندمان گره j با فرض عدم کاربری لوله l و ua_l میزان عدم قابلیت کاربری در لوله l می باشد ($ua_l = 1 - a_l$). همچنین M شمارنده لوله هائی است که به دلیل شکسته شدن از مدار خارج می شوند. $M=0$ مربوط به حالتی است که شبکه بدون هیچگونه حادثه ای بصورت نرمال کار می کند.

برای محاسبه قابلیت اطمینان کل شبکه می توان از همین روابط استفاده کرده و بجای زیرنویس j زیرنویس s را بکار برد.

مدل بهینه سازی

در این مدل برای ترکیب قیود و تابع هدف از روش توابع جریمه خارجی^۴ و برای بهینه سازی تابع هدف بدون قیود جدید از روش گرادیان استفاده گردیده است. تابع هدف که همان تابع قیمت است بصورت زیر تعریف می گردد:

$$MinC = \gamma \sum L_i D_i^e
 \tag{۵}$$

که در آن C قیمت کل لوله ها و L_i و D_i به ترتیب طول و قطر لوله i ام می باشند. γ و e مقادیر ثابتی هستند که با توجه به قیمت لوله های موجود در بازار بدست می آیند. قیود مسئله بصورت قیود مساوی و نامساوی هستند. قیود مساوی همان روابط پیوستگی در گره های شبکه و قیود نامساوی از قرار زیر می باشند:

- ۱ - رابطه تابع هدف مشخص شود.
- ۲ - مقادیر حداقل و حداکثر قيود مشخص شوند.
- ۳ - قيود بی بعد شده و بصورت توابع جریمه خارجی و با ضریب تابع جریمه مشترک در تابع قیمت ترکیب شوند.
- ۴ - حدس اولیه ای برای قطرها و Γ انتخاب گردند.
- ۵ - با استفاده از روش گرادیان ، تابع هدف بدون قید ϕ بهینه شود. در هر جا که نیاز به ارزیابی تابع ϕ یا مشتقات جزئی آن بود به زیر برنامه تحلیلی شبکه به روش HDSM و نیز زیر برنامه محاسبه قابلیت اطمینان مراجعه و مقادیر مورد نیاز از قبیل H, V, R_j, R_s محاسبه گردند.
- ۶ - جوابهای بدست آمده در پایان مرحله ۵ کنترل گردد. اگر با مقادیر در نظر گرفته شده برای قطرها ، تمام قيود ارضا می شوند مرحله ۷ و گرنه مرحله ۸ اجرا شود.
- ۷ - تابع هدف برای قطرهای بدست آمده محاسبه و با مقدار قبلی آن مقایسه گردد. اگر قیمت جدید از مقدار قبلی کمتر بود به مرحله ۸ و در غیر اینصورت به مرحله ۹ برود.
- ۸ - مقدار جدیدی برای Γ در نظر گرفته شده و قطرهای بدست آمده نیز بعنوان حدس جدید منظور و به مرحله ۵ برود.
- ۹ - مقادیر قطرها بعنوان جوابهای نهایی بهینه سازی در نظر گرفته شده و مقدار قیمت بهینه محاسبه گردد.

ارزیابی روش

برای ارزیابی مدل بهینه سازی پیشنهادی دو مثال مورد بررسی قرار می گیرد. مثال ۱ برای نمایش صحت و دقت نتایج و مثال ۲ جهت مشخص نمودن تاثیر قید قابلیت اطمینان در مسئله بهینه سازی بر اثر تغییر پارامترهای مختلف نظیر فشار، سرعت و تقاضا، ارائه شده اند. مثال ۱ : شبکه مربوطه که از مرجع [۱۳] اخذ شده در شکل (۱) و مشخصات لوله ها در جدول (۱) نمایش داده شده اند . تابع هدف و قيود مربوطه به شرح زیر می باشند.

$$MinC = \sum_{i=1}^{NP} 343.06D_i^{1.24}$$

$$H_1 \geq 34.5 \quad H_2 \geq 41.0 \quad H_3 \geq 34.5 \quad H_4 \geq 34.0$$

$$R_1 \geq 38\% \quad R_2 \geq 86\% \quad R_3 \geq 38\% \quad R_4 \geq 68\%$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial D_l} = \gamma e D_l^{e-1} L_l +$$

$$2r \left[\sum_{i=1}^{NP} \left[\frac{\partial v_i}{\partial D_l} \left(\frac{1}{v_{\max}} \max\left(\frac{v_i}{v_{\max}} - 1, 0\right) - \frac{1}{v_{\min}} \max\left(1 - \frac{v_i}{v_{\min}}, 0\right) \right) \right] \right] +$$

$$2r \left[\sum_{j=1}^{NJ} \left[\frac{\partial H_j}{\partial D_l} \left(\frac{1}{H_{\max}} \max\left(\frac{H_j}{H_{\max}} - 1, 0\right) - \frac{1}{H_{\min}} \max\left(1 - \frac{H_j}{H_{\min}}, 0\right) \right) \right] \right] -$$

$$2r \left[\sum_{j=1}^{NJ} \left[\frac{\partial R_j}{\partial D_l} \frac{1}{R_j^{\min}} \max\left(1 - \frac{R_j}{R_j^{\min}}, 0\right) \right] \right] +$$

$$2r \left[\frac{1}{D_{\max}} \max\left(\frac{D_l}{D_{\max}} - 1, 0\right) - \frac{1}{D_{\min}} \max\left(1 - \frac{D_l}{D_{\min}}, 0\right) \right] -$$

$$2r \left[\frac{\partial R_s}{\partial D_l} \frac{1}{R_s^{\min}} \max\left(1 - \frac{R_s}{R_s^{\min}}, 0\right) \right]$$

(۹)

که در آن $l = 1, 2, \dots, NP$.

برای بدست آوردن مقادیر مشتقات جزئی پارامترهایی چون سرعت ، هد و.. نسبت به قطر لوله ها از روش تفاضلات محدود پیشرو استفاده می شود. بعنوان مثال در مورد سرعت در لوله ها مقدار مشتق بطریق زیر بدست می آید.

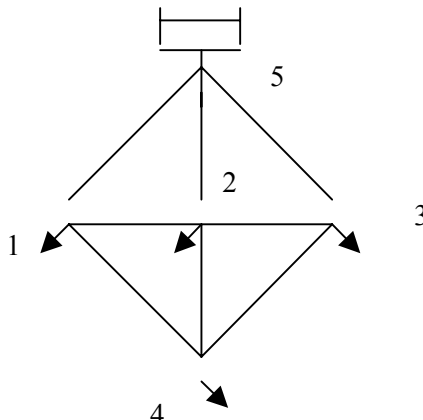
$$\frac{\partial v_i}{\partial D_l} = \frac{v_i \left|_{(D_l + \Delta D_l)} - v_i \right|_{(D_l)}}{\Delta D_l}$$

(۱۰)

به منظور بالا بردن دقت ، در این تحقیق مقدار ΔD_l برابر $D_l / 0.1$ در نظر گرفته شده است (D_l بر حسب میلیمتر می باشد).

همچنین در حالتیکه مشتقات جزئی تابع $f(x)$ نسبت به متغیر X_i موجود نباشند و یا محاسبه آنها مشکل باشد برای یافتن مقدار طول گام بهینه در روش گرادیان، از روش درونیابی درجه دوم استفاده می گردد [۳۱].

در نهایت روند بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری با در نظر گرفتن رابطه دبی - فشار در گره ها و قید قابلیت اطمینان را می توان به شرح زیر خلاصه نمود:



$$Q_1 = 0.48 \text{ m}^3/\text{min}, Q_2 = 0.72 \text{ m}^3/\text{min}, Q_3 = 0.48 \text{ m}^3/\text{min}, Q_4 = 0.84 \text{ m}^3/\text{min} \text{ and } H_5 = 50 \text{ m}$$

شکل ۱: شبکه نمونه مثال ۱ گرفته شده از مرجع [۱۳].

به حد پایینی دارند [۱۹]، به منظور ارضای قیود، قطر لوله ها ناچاراً افزایش خواهند یافت.

جدول ۲: قطر های بهینه برای شبکه مثال ۱.

تابش و کریم زاده	قطر بهینه (mm)		لوله
	Guercio and Xu [13]		
	GRG2	Linear Model	
114	132	130	1
178	195	200	2
114	132	130	3
56	71	60	4
56	71	60	5
52	78	60	6
142	176	160	7
52	78	60	8
1.51E+05	1.91E+05	1.75E+05	قیمت کل (دلار)

علاوه بر این بعلت اینکه مقادیر قابلیت اطمینان ناشی از فرمولهای ۳ و ۴ نسبت به فرمولهای مرجع [۷] بزرگتر می باشند نیازی به افزایش قطر بیشتر در این روش بوجود نمی آید. در نتیجه مقادیر هزینه و قطر لوله ها ناشی از روش پیشنهادی این مقاله از نتایج [۱۳] کوچکتر هستند. عبارت دیگر مقادیر قابلیت اطمینان ناشی از فرمولهای ۳ و ۴ نسبت به قطرهای بهینه حساس نمی باشند. این مطلب در جدول (۴) نمایش داده شده است. علاوه بر این کاربرد روش HDSM مقادیر جریانهای خروجی و هد

نتایج روش پیشنهادی در مقایسه با [۱۳] در جدول (۲) نشان داده شده اند. همچنین مقادیر هد و قابلیت اطمینان هر گره برای قطرهای بهینه (جدول ۲) در جداول (۳) و (۴) ارائه گردیده اند. متذکر می گردد نتایج مرجع [۱۳] براساس تحلیل هیدرولیکی به روش DDSM و محاسبه قابلیت اطمینان براساس فرمولاسیون مرجع [۷] و استفاده از روش Minimum Cut set بدست آمده اند.

جدول ۱: اطلاعات لوله ها در شبکه مثال ۱.

قطر اولیه (mm)	(m)	ضریب زبری	لوله
150	1100	0.01179	1-5
220	1000	0.01184	2-5
150	1100	0.01179	3-5
80	500	0.01177	1-2
80	500	0.01177	2-3
80	1100	0.01172	1-4
200	1000	0.01182	2-4
80	1100	0.01172	3-4

جدول (۲) نشان می دهد که هزینه نهایی شبکه و قطر بهینه بدست آمده توسط روش پیشنهادی این مقاله از نتایج [۱۳] کمتر هستند. یکی از دلایل امر استفاده از فرمولاسیون های متفاوت برای محاسبه قابلیت کاربری و قابلیت اطمینان می باشد. معادلات ۳ و ۴ نشان می دهند که مقادیر قابلیت کاربری و قابلیت اطمینان با افزایش قطر لوله ها ، افزایش می یابند. بعلت اینکه مقادیر قابلیت اطمینان براساس فرمولاسیون مرجع [۷] همیشه تمایل

fortLP توسط مرجع [۱۳] استفاده شده در حالیکه نرم افزار پیشنهادی در این مقاله توسط نویسندگان تهیه گردیده است.

مثال ۲: برای این مثال شبکه شکل (۲) در نظر گرفته شده است. مشخصات شبکه به شرح زیر می باشد.

$$C_{HW} = 130, L_{ij} = 1000m, H_1 = 40m,$$

$$H_j^{des} = 20m, H_j^{min} = 0; \forall j$$

دبی های خروجی در گره های ۲ الی ۶ به ترتیب برابر ۱/۹۸، ۱، ۴/۵، ۵/۵۲ و ۳/۳۶ متر مکعب در دقیقه می باشند. با در نظر گرفتن رابطه بین قطر، وزن و قیمت لوله ها، تابع هدف زیر با روش بهینه سازی کمینه می گردد.

$$Cost = \sum_{i=1}^{NP} 0.0001233D_i^2 L_i$$

که L_i طول لوله i بر حسب متر و D_i قطر لوله i بر حسب میلیمتر و قیمت نیز بر حسب دلار می باشد. این شبکه در دو مرحله به شرح زیر بوسیله روش ارائه شده در این مقاله بهینه می گردد.

الف) در این مرحله چهار حالت قیدی زیر در نظر گرفته می شود:
حالت ۱:

$$D^{max} = 800mm \quad D^{min} = 100$$

$$H^{max} = 60m \quad H^{min} = 5$$

$$V^{max} = 5m/s \quad V^{min} = 0.01$$

$$R_s^{min} = 65\%$$

حالت ۲: مانند حالت ۱ به اضافه قید قابلیت اطمینان در گره ها

$$R_j^{min} = 80\%, \forall j$$

حالت ۳: مانند حالت ۱ با تغییر قید حداقل هد $H^{min} = 20m$

حالت ۴: مانند حالت ۱ با تغییر سرعت های حداقل و حداکثر

$$V^{max} = 2m/s, \quad V^{min} = 0.3m/s$$

تابع هدف در هر یک از حالت های فوق بهینه شده و نتایج در جدول (۵) ارائه گردیده اند. ملاحظه می شود که در هر حالت قطرهای بهینه نسبت به حالت قبل بیشتر شده و در نتیجه قیمت کل نیز افزایش یافته است. افزایش قطرها به این دلیل است که در هر حالت، قیدی اضافی

گره ها را بصورت واقعی تری (نسبت به روش DDSM) محاسبه می نماید. جدول (۳) نشان می دهد که مقادیر هد بدست آمده از نتایج [۱۳] کوچکتر بوده و در نقاط ۲ و ۴ مقادیر هد بحرانی هستند. در حقیقت در این حالت قیود هد، مقادیر قطرهای بهینه را دیکته می نماید. بنابراین هزینه شبکه از دیگر روشها کمتر می باشد. جزئیات مربوط به روشهای مختلف تحلیل هیدرولیکی و محاسبه قابلیت اطمینان در مرجع [۱۹] ذکر شده اند.

جدول ۳: هد گره های شبکه مثال ۱ در حالت بهینه (بر حسب متر).

گره	H _j (m)	
	Guercio and Xu [13]	
	GRG2	Linear Model
1	44.2	44.1
2	44.4	44.7
3	44.2	44.1
4	42.4	40.2

جدول ۴: قابلیت اطمینان گره های شبکه مثال ۱ در حالت بهینه (بر حسب درصد).

گره	R _j (%)	
	Guercio and Xu [13]	
	GRG2	Linear Model
1	64.5	64.5
2	86.6	86.9
3	64.5	64.5
4	71.7	70.4

یکی از مزایای روش پیشنهادی آنست که برای یافتن حداقل قطر، می تواند هرگونه حدس اولیه را بدون ارضا کردن تمامی قیود بپذیرد. در حالیکه در روش مرجع [۱۳] مقادیر اولیه قطر لوله ها باید تمامی قیود را ارضا نمایند. یافتن چنین مقادیری بخصوص در شبکه های پیچیده کار دشوار و زمان بری می باشد.

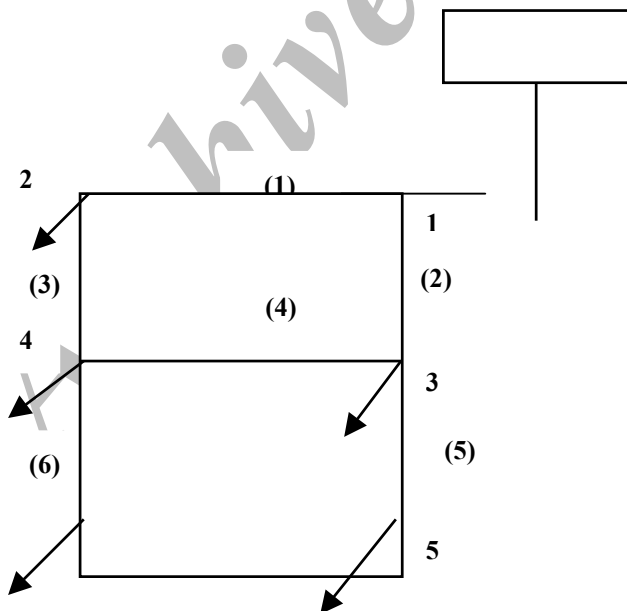
همچنین قابل ذکر است که در روش مرجع [۱۳] تنها شکست برخی از لوله ها در روش Minimum Cut set در نظر گرفته شده، در حالیکه در روش این مقاله اثرات شکست تمامی لوله ها بررسی شده و مقدار تابع هدف کوچکتری نیز بدست آمده است. همچنین برای حل مسئله بهینه سازی نرم افزارهای تجاری GRG2 و

آورد که هم قیمت در حد مناسبی باشد و هم عملکرد شبکه در حالات بحرانی تضمین شده باشد. با ملاحظه جدول (۷) مشخص می شود که هد گره های ۴ و ۵ و ۶ تقریباً در کلیه حالات از هد بقیه گره ها کمتر هستند و این بدلیل دور بودن این گره ها از مخزن می باشد. همچنین طبق جدول ۶، مقدار قابلیت اطمینان در این گره ها نیز کمتر از سایر گره ها می باشد. به این ترتیب رابط مستقیم هد و قابلیت اطمینان گره ها مشخص می گردد.

علاوه بر این جدول (۷) نشان می دهد که هد هر گره عموماً در هر حالت نسبت به حالت قبل بیشتر شده است. دلیل این مطلب آنست که چون در هر حالت قطرهای بهینه نسبت به حالت قبل بیشتر می شود بنابراین با توجه به رابطه هیزن ویلیامز چون قطر در مخرج کسر قرار دارد میزان افت در لوله ها کاهش یافته و در نتیجه مقدار هد در گره ها افزوده می شود. استثناء مشاهده شده در گره ۲

نسبت به حالت ۱ وارد مسئله شده و یا محدوده تغییرات قید کاهش یافته است. بعنوان مثال مطابق جدول (۶) در حالت ۱ قید قابلیت اطمینان در گره های ۴ و ۵ و ۶ از ۸۰ درصد کمتر می باشد. بنابراین برای افزایش قابلیت اطمینان گره ای تا مرز ۸۰ درصد، اقطار و قیمتها در حالت ۲ افزایش یافته اند. در نتیجه هر قدر محدوده تغییرات پارامترها (دامنه بین حد بالائی و حد پائینی) در قیود کمتر باشد قطر لوله ها و در نتیجه هزینه شبکه بیشتر خواهد شد.

همچنین از جدول (۵) ملاحظه می شود که قابلیت اطمینان کل شبکه در هر حالت نسبت به حالت قبلی بیشتر است. دلیل این مطلب افزایش قطرهای در هر حالت می باشد. بنابراین بطور طبیعی با افزایش قطرهای قابلیت اطمینان سیستم نیز افزایش می یابد. بطور کلی این نتیجه بدست می آید که برای یک دبی خاص در شبکه، با افزایش مقدار قابلیت اطمینان شبکه، مقدار قیمت کل شبکه نیز افزایش می یابد. بنابراین می توان در استانداردها مقدار R_s مطلوب شبکه را به گونه ای بدست



شکل ۲: شبکه نمونه مثال ۲.

بدلیل آنست که قطر لوله ۲ در حالت ۴ از حالت ۳ کمتر شده و در نتیجه بدلیل افت هد بیشتر، هد در گره ۲ کمتر حالت ۳ می گردد. با در نظر گرفتن تغییر عمده قطر لوله ۲ در حالت ۴ نسبت به حالت ۳، می توان نتیجه گرفت از نظر فیزیکی در حالت ۴ شبکه بهینه تمایل دارد قسمت اعظم جریان خروجی از منبع را از لوله ۲ عبور دهد.

جدول (۸) نشان می دهد که نوسانات سرعت در هر لوله در حالات مختلف تقریباً مقدار کمی می باشد. این مسئله مشخص می کند که در حالت قطرهای بهینه، سرعت در لوله ها در محدوده مشخصی ثابت دارد و قطرهای بهینه به گونه ای تعیین می شوند که سرعت در لوله ها تغییر چندانی نکند. این موضوع، این نکته را که برای طرح بهینه یک شبکه آبرسانی بهتر است سرعت در لوله ها را برابر مقدار خاصی در نظر گرفته شود (مثلاً ۰/۸ تا ۱/۲ متر بر ثانیه) و قطرها بر این اساس طرح گردند، تایید می نماید.

همچنین از جداول (۸) و (۹) مشاهده می شود که سرعت و در نتیجه دبی لوله ۶ در تمام حالات بهینه بسیار ناچیز می باشند. گرچه از نظر هیدرولیکی این لوله ممکن است زائد بنظر برسد ولی وجود آن برای تضمین عملکرد شبکه در شرایط بحرانی مانند شکست لوله ها و بالا بردن قابلیت اطمینان (از طریق حفظ تعدد راههای ارتباطی بین گره ۶ و منبع به منظور ارضاء دبی و فشار مورد نیاز در گره ۶) ضروری است. همچنین طبق جدول (۹) با توجه به سرعت و قطر بهینه لوله ها، دبی در لوله ۲ در تمام مدت همواره بیشترین مقدار می باشد. این لوله بدلیل نزدیکی به مخزن و شرایط شبکه بیشترین قطر را در هر حالت دارا می باشد.

جدول ۹: دبی لوله های شبکه مثال ۲ در حالات مختلف قیدی (بر حسب متر مکعب بر دقیقه).

لوله	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
1	2.04	2.63	2.92	3.55
2	8.98	12.04	14.12	13.49
3	0.57	0.95	1.24	1.87
4	1.88	2.71	3.19	3.01
5	5.12	7.35	8.95	8.5
6	0.07	0.08	0.07	0.38
7	1.67	2.59	3.43	2.98

جدول ۵: قطر های بهینه برای شبکه مثال ۲ در حالات مختلف قیدی (بر حسب میلیمتر).

لوله	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
1	151	180	214	210
2	302	361	405	494
3	113	135	147	256
4	151	180	205	200
5	226	270	318	304
6	113	135	148	189
7	226	270	294	300
R _s (%)	64.18	86.11	99.8	99.98
قیمت کل (دلار)	32,612	46,530	59,544	75,436

جدول ۶: قابلیت اطمینان گره های شبکه مثال ۲ در حالات مختلف قیدی (بر حسب درصد).

حالت قید	R2	R3	R4	R5	R6
حالت ۱	86.74	99.98	52.29	61.95	51.37
حالت ۲	99.96	99.98	80	86.23	80
حالت ۳	99.99	99.99	99.57	99.97	99.65
حالت ۴	99.99	99.99	99.98	99.98	99.97

جدول ۷: هد گره های شبکه مثال ۲ در حالات مختلف قیدی (بر حسب متر).

حالت قید	H2	H3	H4	H5	H6
حالت ۱	15.05	26.71	5.47	7.68	5.29
حالت ۲	23.14	30.51	12.71	14.87	12.6
حالت ۳	31.21	32.72	20	22.56	20.03
حالت ۴	26.17	37.46	24.56	25.95	24.19

جدول ۸: سرعت در لوله های شبکه مثال ۲ در حالات مختلف قیدی (بر حسب متر بر ثانیه).

لوله	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴
1	1.9	1.73	1.35	1.71
2	2.1	1.96	1.83	1.17
3	0.95	1.11	1.22	0.61
4	1.74	1.78	1.61	1.6
5	2.12	2.14	1.88	1.95
6	0.11	0.09	0.07	0.23
7	0.69	0.75	0.84	0.7

چه دبی درخواستی در یک گره افزایش یابد باعث کاهش قابلیت اطمینان در آن گره می شود و هر قدر این کاهش بیشتر باشد اگر برای قابلیت اطمینان آن گره مقدار حداقلی تعیین شده باشد باعث افزایش بیشتر قیمت شبکه خواهد شد. کاهش قابلیت اطمینان به این دلیل است که وقتی یک دبی اضافی به شبکه تحمیل می گردد افت فشار در لوله ها بیشتر شده و هد و دبی خروجی و در نتیجه مقدار قابلیت اطمینان گره های شبکه کاهش می یابد. بنابراین این می توان پیشنهاد نمود در حالت استاندارد دو مقدار حداقل برای قابلیت اطمینان یک شبکه در نظر گرفته شود. یکی در حالت دبی نرمال و دیگری در حالت دبی های آتش نشانی. حداقل قابلیت اطمینان در نظر گرفته شده برای حالت دبی آتش نشانی باید کمتر از حالت نرمال باشد. با توجه به این مقدار می توان شبکه را در دو حالت نرمال و آتش نشانی طرح و کنترل نمود.

جدول (۱۲) نشان می دهد که وقتی دبی آتش نشانی در گره های ۴ و ۵ و ۶ واقع است قیمت نسبت به حالات دیگر بیشتر است. عبارت دیگر هر قدر دبی آتش نشانی از گره منبع دورتر باشد قیمت طرح بهینه بیشتر خواهد شد. زیرا با دورتر شدن دبی آتش نشانی از منبع، مقدار R_s کاهش می یابد و برای افزایش آن نسبت به مقدار R_s^{\min} لازم است که قطرها افزایش یابند. حداکثر قیمت مربوط به حالت ۹ (دبی آتش نشانی در گره ۶) می باشد. چون گره ۶ دورترین گره از منبع می باشد، مقدار قابلیت اطمینان آن کمتر از سایر گره هاست. همچنین موقعی که دبی آتش نشانی در این گره اعمال می شود اگر قیدی برای حداقل قابلیت اطمینان در این گره در نظر گرفته شود باعث افزایش چشمگیر قیمت شبکه نسبت به سایر حالات خواهد شد.

بنابراین می توان نتیجه گرفت برای یافتن قطرهای بهینه یک شبکه که بتواند کلیه قیود را در تمام حالات بحرانی ارضا نماید کافی است دبی آتش نشانی صرفاً بر روی گره بحرانی قرار گرفته و شبکه را صرفاً در این حالت بهینه نمود.

جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله روشی برای بهینه سازی شبکه های

ب) در این مرحله شبکه شکل (۲) برای قیود حالت ۱ در شرایطی که بجای دبی گره، یک دبی ثابت آتش نشانی برابر ۱۵ متر مکعب بر دقیقه به ترتیب و بطور مجزا در هر یک از گره های ۲ تا ۶ شبکه اعمال گردد (۵ حالت جدید) مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۱۰). همچنین فرض می شود قابلیت اطمینان گره ای صرفاً در گره ای که دبی آتش نشانی از آن برداشت می شود از ۸۰ درصد بیشتر بوده و برای سایر گره ها قید قابلیت اطمینان گره ای در نظر گرفته نمی شود. دلیل این امر اینست که چون مهمترین هدف، تامین دبی آتش نشانی می باشد و فرض می شود این حالت بحرانی زیاد طول نکشد، می توان اجازه داد که در طول مدت اطفاء حریق دبی سایر نقاط نسبت به میزان مورد تقاضا کاهش یابند. بنابراین صرفاً احتمال تامین آب در گره مورد نظر از حد معینی بالاتر خواهد بود. نتایج بهینه سازی در این مرحله در جداول (۱۱) و (۱۲) ارائه شده اند.

در جدول (۱۱) ملاحظه می شود در اکثر موارد مقدار قابلیت اطمینان در گره های ۲ و ۳ بیشترین مقدار را دارا هستند. این مسئله بدلیل نزدیک بودن این دو گره به منبع و اتصال آنها به منبع فقط توسط یک لوله می باشد. فقط شکست همین لوله متصل کننده این گره ها به منبع باعث کاهش دبی در آنها خواهد شد و شکست بقیه لوله ها تاثیر مهمی در دبی این گره ها نخواهد داشت. همچنین قابلیت اطمینان گره های ۴ و ۵ و ۶ بدلیل دوری از منبع به ترتیب کاسته می شود. همچنین مشاهده می شود که در تمام حالات دبی، قابلیت اطمینان گره ۳ بیش از گره ۲ می باشد. دلیل این موضوع آنست که گره ۳ به ۳ لوله و گره ۲ به ۲ لوله متصل هستند. در نتیجه در موقع بررسی شکست لوله ها، هرگاه یکی از لوله های متصل به گره ۲ بشکند دبی این گره فقط از طریق یک لوله می تواند تامین می گردد. در صورتی که در مورد گره ۳، ۲ لوله باقی می ماند که این موضوع باعث بالا رفتن قابلیت اطمینان گره ۳ می گردد. بنابراین افزایش لوله های متصل به هر گره یکی از راههای افزایش قابلیت اطمینان هر گره می باشد. البته در بحث بهینه سازی باید ترکیب قابلیت اطمینان گره و قیمت شبکه در حد قابل قبول قرار گیرد. همچنین این جدول نشان می دهد که هر

جدول ۱۰: مقادیر دبی لوله ها و قابلیت اطمینان گره ها در شبکه مثال ۲ در حالات مختلف اعمال دبی آتش نشانی.

دبی (بر حسب متر مکعب بر دقیقه)						گره
حالت ۱	حالت ۵	حالت ۶	حالت ۷	حالت ۸	حالت ۹	
1.68	15	1.68	1.68	1.68	1.68	2
1.98	1.98	15	1.98	1.98	1.98	3
4.5	4.5	4.5	15	4.5	4.5	4
5.52	5.52	5.52	5.52	15	5.52	5
3.36	3.36	3.36	3.36	3.36	15	6
-	$R_2^{\min} = 80$	$R_3^{\min} = 80$	$R_4^{\min} = 80$	$R_5^{\min} = 80$	$R_6^{\min} = 80$	قید قابلیت اطمینان گره ای (%)

جدول ۱۱: قابلیت اطمینان گره های شبکه مثال ۲ در حالات مختلف اعمال دبی آتش نشانی (بر حسب درصد).

حالت دبی	R2	R3	R4	R5	R6
حالت ۱	86.74	99.98	52.29	61.95	51.37
حالت ۵	80	99.99	65.92	81.03	77.1
حالت ۶	97.9	83.28	53.02	54.92	50.08
حالت ۷	99.99	99.99	80	88.25	82.45
حالت ۸	100	99.99	99.99	80.02	95.41
حالت ۹	99.99	99.99	90.53	80.37	80.11

جدول ۱۲: قطر های بهینه برای شبکه مثال ۲ در حالات مختلف اعمال دبی آتش نشانی (بر حسب میلیمتر).

لوله	حالت ۱	حالت ۵	حالت ۶	حالت ۷	حالت ۸	حالت ۹
1	151	295	172	303	350	509
2	302	361	346	407	429	352
3	113	134	129	172	270	303
4	151	139	172	291	537	167
5	226	269	259	292	299	251
6	113	164	128	148	232	409
7	226	340	259	297	175	503
قیمت کل (دلار)	32,612	57,887	42,671	69,923	103,777	121,571

رسید.

مثالهای نمونه حل شده در این مقاله نشان می دهند که روش ارائه شده این مقاله در مقایسه با روشهای موجود دارای دقت بیشتری است و تابع هدف مقدار کمتری پیدا می کند. همچنین شرایط و نقاط بحرانی که می توانند در روند بهینه سازی تأثیرگذار باشند بصورت واقعی مشخص می گردند. از دیگر نتایج بدست آمده از این مثالها اینست که با توجه به تعریف بکار رفته برای فاکتور قابلیت اطمینان که مستلزم شناسائی شکست تمامی لوله ها و تکرار تحلیل شبکه برای تمامی حالات شکست ممکن تا

آبرسانی با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان و رابطه دبی-فشار در گره ها ارائه گردید. با استفاده از روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار و فاکتور قابلیت اطمینان، چگونگی عملکرد شبکه در شرایط بحرانی و غیر طبیعی به نحو واقعی و دقیقی مورد ارزیابی کمی قرار می گیرد. همچنین با بهره گیری از روشهای توابع جریمه خارجی، گرادیان و درون یابی درجه دوم تابع هدف به نحو مطلوبی بهینه می گردد، به صورتی که بر خلاف روش [۱۳] با هر فرض اولیه ای برای قطرها که حتی ممکن است برخی قیود را ارضاء ننماید می توان به جواب مطلوب

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه تهران که پشتیبانی این پژوهش را در قالب طرح پژوهشی تقبل نمودند تقدیر و تشکر می‌گردد.

رسیدن به تابع هدف کمینه می‌باشد، زمان اجرای برنامه را علیرغم رسیدن به دقت بالاتر، طولانی‌تر می‌نماید. در این حالت با عنایت به نتیجه گیری [۱۴] پیشنهاد می‌شود که تنها شکست لوله‌های بحرانی مورد ارزیابی قرار گرفته و از در نظر گرفتن تاثیر شکست لوله‌های کم اهمیت‌تر صرف‌نظر گردد.

مراجع

- 1 - Alproovits, E. and Shamir, U. (1977). "Design of optimal water distribution systems." *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 6, PP. 885-900.
- 2 - Morgan, D. R. and Goulter, I. C. (1985). "Optimal urban water distribution design." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 5, PP. 642-652.
- 3 - Lansey, K. E. and Mays, L. W. (1989). "Optimization model for water distribution system Design." *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 115, No. 10, PP. 1401-1418.
- 4 - Savic, D. and Walters, G. (1997). "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks." *J. Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 123, No. 2, PP. 67-77.
- 5 - Rowel, W. F. and Barnes, J. (1982). "Obtaining layout of water distribution systems." *J. Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 108, No. 1, PP. 137-148.
- 6 - Goulter, I. C. and Coals, A. V. (1986). "Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks." *J. Transportation Engineering, ASCE*, Vol. 112, No. 3, PP. 287-301.
- 7 - Su, Y. C., Mays, L. W., Duan, N. and Lansey, K. E. (1987). "Reliability-Based optimization model for water distribution systems." *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 12, PP. 1539-1556.
- 8 - Fujiwara, O. and De Silva, A. U. (1990). "Algorithm for reliability-based optimal design of water networks." *J. Environmental Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 3, PP. 575-587.
- 9 - Fujiwara, O. and Tung, H. (1991). "Reliability improvement for water distribution networks through increasing pipe size." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 7, PP. 1395-1402.
- 10 - Fujiwara, O. and Ganesharajah, T. (1993). "Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 8, PP. 2917-2924.
- 11 - Cullinane, M. J., Lansey, K. E. and Mays, L. W. (1992). "Optimization-availability-based design of water distribution networks." *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 3, PP. 420-441.
- 12 - Khomsi, D., Walters, G. A., Thorley, A. R. D. and Ouazar, D. (1996). "Reliability tester for water distribution networks." *J. Computing in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 10, No. 1, PP. 10-19.
- 13 - Guercio, R. and Xu, Z. (1997). "Linearized optimization model for reliability-based design of water systems." *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 11, PP. 1020-1026.
- 14 - Xu, C. and Goulter, I. C. (1999). "Reliability-based optimal design of water distribution networks." *J. Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 125, No. 6, PP. 352-361.
- 15 - Goulter, I. C. (1995). "Analytical and simulation models for reliability analysis in water distribution systems." *Improving efficiency and reliability in water distribution systems*, (E. Cabrera and A.F. Vela, eds.), Kluwer Academic, London, PP. 235-266.
- 16 - Bhave, P. R. (1978). "Noncomputer optimization of single source networks." *J. Environmental Engineering, ASCE*, Vol. 104, No. EE4, PP. 799-813.

- 17 - Awumah, K. and Goulter, I. C. (1992). "Maximizing entropy-defined reliability of water distribution networks." *Engineering Optimization*, Vol. 20, No. 1, PP. 57-80.
- 18 - Tanyimboh, T. T. and Templeman, A. B. (1993). "Optimum design of flexible water distribution networks." *Civil Engineering Systems*, Vol. 10, No. 3, PP. 243-258.
- 19 - Tabesh, M. (1998). *Implications of the Pressure Dependency of Outflows on Data Management, Mathematical Modeling and Reliability Assessment of Water Distribution Systems*. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Liverpool, England.
- 20 - Tanyimboh, T. T., Tabesh, M. and Burrows, R. (2001). "An appraisal of the source head method for calculating the reliability of water distribution networks." *J. Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 127, No. 4, PP. 206-213.
- 21 - Gupta, R. and Bhawe, P. R. (1996). "Comparison of methods for predicting deficient network performance." *J. Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. 122, No. 3, PP. 214-217.
- 22 - Bhawe, P. R. (1981). "Node flow analysis of water distribution systems." *J. Transportation Engineering, ASCE*, Vol. 107, No. TE4, PP. 457-467.
- 23 - Bhawe, P. R. (1991), *Analysis of flow in water distribution networks*, Technomic Publishing Co., Lancaster, Pa.
- 24 - Germanopoulos, G. (1985). "A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models." *Civil Engineering Systems*, Vol. 2, PP. 171-179.
- 25 - Wagner, J. M., Shamir, U. and Marks, D. H. (1988). "Water distribution reliability: Simulation Methods." *J. Water Resources Planning & Management, ASCE*, Vol. 114, No. 3, PP. 276-294.
- 26 - Reddy, L. S. and Elango, K. (1989). "Analysis of water distribution networks with head dependent outlets." *Civil Engineering Systems*, Vol. 6, No. 3, PP. 102-110.
- 27 - Martinez, F., Conejos, P. and Vercher, J. (1999). "Developing an integrated model for water distribution systems considering both distributed leakage and pressure dependent demands." *Proceedings of the 25th ASCE Annual Conference*, June, Arizona.
- 28 - Chandapillai, J. (1991). "Realistic simulation of water distribution systems." *J. Transport Engineering, ASCE*, Vol. 117, No 2, PP. 258-263.
- 29 - Twort, A. C., Crowley, F. W. and Ratnayaka, D. D. (1994). *Water supply*, Edward Arnold.
- 30 - UK Water Industry, (1994). "Managing leakage. Report G: Managing water pressure." *WRc plc/ Water Service Association/ Water Companies Association*, Swindon, U.K.
- ۳۱ - کریم زاده، آر.ش. "بهینه سازی شبکه های آبرسانی با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان و رابطه دبی - فشار در گره ها." پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، (۱۳۷۸).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Redundancy
- 2 - Minimum Cut Set Method
- 3 - Availability
- 4 - External Penalty Function