تعیین قطر اقتصادی لوله ها در شبکه های توزیع آب

نویسنده: مهندس مهدی بیجاری

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

حل هر شبکه توزیع آب، بی نهایت جواب دارد که از نظر فنی و طراحی قابل قبول است، ولی پیدا کردن اقتصادی ترین این جوابها امری مشکل و شاید غیر ممکن است. مدل برنامه ریزی ریاضی این مسئله بصورت برنامه ریزی غیر خطی است حل آن در ابعاد عملی بسیار مشکل است. تاکنون روشهای ابتکاری(heuristic) برای حل این مسئله پیشنهاد شده است، که هیچکدام به بهینه واقعی مسئله دست پیدا نمیکنند و اکثرا" در جهت ساده سازی مدل برای تبدیل مدل بصورت برنامه ریزی خطی بوده اند.

دراین روش ابتدا کوهتریـن مسیر برای رساندن آب به هر نقطه مصرف بدست میآید و با استفاده از آن، مقدار جریان در هر لوله مشخص میشود. سپس با داشتن مقدار جریان در هر لوله، یك مدل برنامه ریزی غیر خطی برای بدست آوردن قطرهای بهینه حل میشود. در ساختن مدل نیز ایده های جدیدی برای ساده سازی مدل ریاضی و کم کردن حجم محاسبات اعمال شده است.

برای مقایسه روش با روشهای پیشنهادی قبلی، مثال مربوط به شبکه توزیع آب شهرنیویورك، که با روشهای قبلی حل شده است، حل شد و جواب بدست آمده باجوابهای این روشها مقایسه گردید نتیجه این بود که جواب بدست آمده از جوابهای قبلی بهتر است.

۱ ـ مروری بر کارهای انجام شده در زمینه طرح بهینه شبکه های توزیع آب

محققین بر روی روشی که بتواند برای یك شبکه قطرهای بهینه را پیدا کند، سالها کار کرده اند. روشهای مختلفی جهت بهینه کردن شبکه توزیع آب ارائه شده است، ولی تاکنون بر اساس روشهای پیشنهادی موفق به پیدا کردن بهترین شبکه نشده اند. برخی از این روشها بر مدل سازی ریاضی و تکنیکهای برنامه ریزی ریاضی (تحقیق درعملیات [1]) متکی است. برخی دیگر براساس روشهای ابتکاری است.

اولین کار در این زمینه با استفاده از مدلسازی ریاضی لای وشاکه [2] انجام شده است. مدل ریاضی استفاده شده توسط آنها یك مدل برنامه ریزی خطی است. در این روش ابتدا باید مقادیر فشار در گره ها به گونه ای انتخاب شود که جمع جبری افت فشارها برابر صفر باشد. این مدل توسط این عامل که فشار در هر گره باید مشخص و ثابت باشد محدود میشود.

کوین دری ، برییل ولیبمن[3] در روش خود مدل برنامه ریزی خطی لای وشاکه را با یك روش جستجوی گرادیان ترکیب کرده و براساس شبه قیمت های (متغیرهای همزاد) بدست آمده از حل مدل فوق فشار در گره ها را تغییر داده اند. در روش آنها ابتدا مقادیر اولیه فشار در گره ها انتخاب و مدل برنامه ریزی خطی حل شده و سپس با استفاده از جوابهای آن فشار در گره ها تغییر میکند و دوباره مدل حل میشود. این عمل چندین بار تکرار میشود.

روش مورگان و گولتر[4] براساس یك مدل برنامه ـ ریزی خطی و یك حل کننده شبکه (هاردی کراس) است . مرحله برنامه ریزی خطی برای تعیین قطر لوله ها استفاده میشود و روش هاردی کراس برای متوازن کردن جریانها و فشارها استفاده میگردد.این عمل چندین بار تکرار میشود تا عمل بهینه کردن انجام گردد.

گسلروالسکی[5] برای پیدا کردن قطرهای بهینه برنامه ای به نام وادیز و تهیه کرده اند. روش آنها براساس سعی و خطا است . مقالهٔ"انتخاب بهترین قطر لوله ها ، در یك سیستم توزیع آب " که در نشریه شماره ۱ کمیته تحقیقات آب وفاضلاب اصفهان چاپ شده است ، در مورد روش آنهاست .

بی ها و نیز یك روش ابتکاری بر اساس عبور جریان از کوتاهترین مسیر ارائه داده است . محققین روی روشهای دیگری نیز کارکرده‌اند که به علت طولانی شدن مقاله و کم اهمیت بودن آنها از ذکرشان خودداری میشود.

۲ ـ روش ابداعی

مسئله این است که در شبکه ای حلقوی با یك منبع که فشار آن معین و طرح استقرار شبکه مشخص است ، قطر لوله ها را به گونه ای بدست آوریم که هزینه شبکه (لوله ها) کمینه شود.

محدودیتهای این مسئله بصورت زیر است :

ـ قانون پیوستگی جریان (قانون اول کیرشهف) درهرگره برقرار باشد.

ـ جمع جبری افت فشارها در یك حلقه برابر صفر باشد.

ـ فشار در هر گره بین یك حد بالا و پائین باشد.

ـ مصرف در هر گره تأمین شود.

۲ ـ ۱ ـ مدل سازی

از آنجایی که قطر لوله های موجود در بازار قطرهای خاصی است ، مدل ریاضی این مسئله باید بامتغییرهای صحیح ساخته شود. ولی چون روشهای کار اجرای حل مسائل برنامه ریزی غیر خطی با متغیرهای صحیح وجود ندارند و حل مدل با اشکال مواجه میشود. قطرلوله ها را پیوسته فرض میکنیم . پس از بدست آوردن قطر بهینه از حل مدل ، این قطر به دو لوله با قطرهای موجود در بازار تبدیل میشود، بطوری که مجموع افت فشار آنها معادل افت فشار قطر بدست آمده شود.

تعریف پارامترها :

L_{ij} = طول لوله از i به j

H_{minj} = حداقل فشارمجاز در گره j

H_{maxj} = حداکثر فشار مجاز در گره j

Q_j = مصرف در گره j

H = فشار منبع

C_{ij} = هزینه لوله از گرهi به گرهj

K_1 = هزینه ثابت یك شاخه

فرض میشود که قیمت لوله با طول و قطر آن این رابطه را دارد:

$$C_{ij} = K_1 L_{ij} X^m_{ij} \qquad : (۱)$$

که در آن X_{ij} قطر لوله است . هزینه یك متر لوله بدین صورت برآورده شده است[6].

$$C_{k0} = K_w \gamma \frac{P \pi^2}{2\delta} d^2 \qquad : (۲)$$

که در آن C_{k0} هزینه یك متر لوله، p فشار داخلی لوله، K_w هزینه تهیه ونصب یك تن لوله، وزن مخصوص تنش مجاز برشی و d قطر لوله میباشند. بنابر این m در رابطهٔ (۴) برابر ۲ است .

مدل برنامه ریزی ریاضی مسئله را به فرم زیر میتوان ساخت ، متغیرهای تصمیم عبارتند از X_{ij} قطر لوله از i به j و q_{ij} مقدار جریان از ابه j

تابع هدف[7]

$$\text{Min} \sum_i \sum_j K_1 L_{ij} X^2_{ij}$$

محدودیتها

$$\sum_{(i,j)\in \text{Loop}_E} h_{ij} = 0 \qquad E = 1,\ldots,M \qquad : (۳)$$

$$\sum_{i\in B(j)} q_{ij} - \sum_{k\in A(j)} q_{jk} = Q_j \qquad j = 2,\ldots,k$$

برای گره منبع

$$K \sum_{\in A(1)} q_{ik} = Q_1$$

$$H_{min\,j} \leqslant H_j \leqslant H_{maxj} \qquad j = 1,\ldots,K$$

$$V_{min} \leqslant V_{ij} \leqslant V_{max} \quad x \quad i = 1,\ldots,K-1 \quad j = 2,\ldots,K$$

که K تعداد گره ها ، M تعداد حلقه ها، LOOP_E مجموعه شعبه های E حلقه ، B(j) مجموعه گره های قبل از j و A(j) مجموعه گره های بعد از j ، Q_j مصرف در گره j ، h_{ij} افت فشار در شاخه (ij) میباشند.

برای داشتن تنها دو متغیر تصمیم[8] قطر لوله وجریان در لوله درمدل ، محدودیت سرعت را نیز بر حسب این دو متغیر بیان میکنیم . با استفاده از رابطهٔ دبی جریان با سرعت و سطح مقطع این مقصود حاصل میشود:

$$q = V.A \qquad V = \frac{q}{A} = \frac{4q}{\pi d^2} \qquad : (۴)$$

بنابر این محدودیت سرعت معادل است با :

$$V_{min} \leqslant \frac{4\, q_{ij}}{\pi X^2_{ij}} \leqslant V_{max} \qquad : (۵)$$

محدودیت فشار در گره ها، نیز برحسب دو متغیر تصمیم فوق الذکر باید بیان شود. طبق رابطه هیزن ویلیامز افت فشار برابراست با:

$$h_{ij} = \frac{K_{HW}\, L_{ij}\, q^p_{ij}}{C_{HW}\, p_{ij}\, X^r_{ij}} \qquad : (۶)$$

بدلیل سادگی عوامل موجود در رابطه هیزن ویلیامز و گویایی فاکتور اصطکاك درآن، از این فرمول در مدلسازی استفاده شده است . فشار در یك گره برابر است با فشار منبع منهای افت فشار لوله های مسیری که آب را از منبع به گره مورد نظر میآورند:

$$H_j = H_1 - \sum_{(i,1)\in S_j} h_{il} \qquad : (۷)$$

که در آن : S_j : مسیر از منبع تا گره j است .

حل مدل برنامه ریزی غیر خطی (۳) باتوجه به تعداد محدودیتها و متغیرهای تصمیم ، حتی برای شبکه های متوسط نیز بسیار مشکل و وقت گیر است . مخصوصا" اینکه در مدل فوق جهت جریانها نیز باید مشخص باشد و با جهتهای جریان متفاوت به جوابهای متفاوت میرسیم . پس باید به طریقی مدل را ساده سازی کرد. برای اینکار روش ابتکاری زیرپیشنهاد میشود :

ـ ابتدا جهت جریانهای مناسب را تعیین میکنیم.

ـ بعد از بدست آوردن درخت توزیع بهینه جریانهای مناسب به گونه ای تعیین شود که محدودیت پیوستگی جریان در هر گره برقرار باشد.

ـ با مشخص شدن مقدار جریان بهینه درهرشاخه قطرهای بهینه بنحوی تعیین میشوند که جمع جبری افت فشار در یك حلقه صفر شده و فشار در گره ها از حدود مجاز بیشتر یا کمتر نشود.

۲ ـ ۲ ـ تبین و توضیح روش

برای یافتن درخت توزیع مناسب به این نکته توجه میکنیم که هرچه جریان برای رسیدن به محل مصرف مسافت کمتری بپیماید، احتمالا" هزینه کمتری[۱۰] دارد. زیرا هرچه مسافت طی شده کمتر باشد، افت فشار کمتر شده و قطر لوله میتواند کاهش یابد. برای پیدا کردن جریانهای بهینه در شاخه ها مدل ریاضی[۱۱] زیر را ساخته و از آن کمك میگیریم.

$$\text{Min} \sum_{i,j} \cdot C_{qij} \cdot q_{ij} \qquad :(۸)$$

$$\text{S.t.} \begin{cases} \sum_{i \in B(j)} q_{ij} - K \sum_{\epsilon A(j)} q_{jk} = Q_j \\ K \sum_{\epsilon A(l)} q_{ik} = Q_l \\ F_{ij} \leqslant q_{ij} \leqslant A_{max} \cdot V_{max} \end{cases}$$

که A_{max} حداکثر سطح مقطع لوله موجود در بازار و F_{ij} مصرف در طول لوله $i-j$ است، مقدار مصرف آب در طول لوله صورت میگیرد که برای راحتی محاسبات مقدار آن درگره انتهایی فرض میشود. Q_j مصرف درگره j است. حداکثردبی درهر لوله برابر حداکثر سطح مقطع براساس حداکثر قطر لوله موجود در حداکثر سرعت ایده آل است.

C_{qij} هزینه یك واحد جریان از i به j است، اکنون C_{qij} را بدست میآوریم:

$$C_{qij} = \frac{\partial C_{ij}}{\partial q_{ij}} = \frac{\partial C_{ij}}{\partial d_{ij}} \cdot \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_{ij}} \qquad :(۹)$$

با استفاده از رابطه (۱) و نتیجه رابطه (۲) C_{ij} معلوم است.

$$\frac{\partial C_{ij}}{\partial d_{ij}} = 2 K_1 L_{ij} d_{ij} \qquad :(۱۰)$$

از رابطه (۴) داریم:

$$d = \left(\frac{4 q}{\pi V} \right)^{1/2} \qquad :(۱۱)$$

سرعت (V_{ij}) را برای همه شاخه ها ثابت فرض میکنیم.

$$\frac{\partial d_{ij}}{\partial q_{ij}} = \left(\frac{2}{\pi V_{ij}} \right) \left(\frac{4 q_{ij}}{\pi V_{ij}} \right)^{-1/2} \qquad :(۱۲)$$

از جایگذاری رابطهٔ (۱۱) در رابطه (۱۰) و جای ـ گذاری روابط (۱۰) و (۱۲) در رابطهٔ (۹) رابطهٔ زیر بدست میآید:

$$C_{qij} = 2 K_1 L_{ij} \left(\frac{2}{\pi V_{ij}} \right) \qquad :(۱۳)$$

طبق رابطه (۱۳) هزینه جریان رابطه مستقیم با طول شاخه دارد. از این رابطه نتیجه میشود که در مدل (۸) جریانهای بهینه با عبور از کوتاهترین مسیر برای رسیدن به نقطه مصرف بدست میآیند.

برای بدست آوردن جریان بهینه وجهت مناسب آن درشبکه ابتداکوتاهترین فاصله از گره منبع به دیگر گره های شبکه را بدست میآوریم. این مسیرها[۱۲] تشکیل یك درخت گسترش میدهند. در صورتی که M گره و درشبکه وجود داشته باشند، $(M-1)$ شاخه در درخت گسترش وجود خواهد داشت. لوله های واقع بر درخت کوتاهترین مسیر[۱۳]، لوله های اصلی شبکه میشوند. جهت جریان در شاخه های واقع بر درخت گسترش از منبع به طرف سرشاخه است. لوله های

باقیمانده به این درخت اضافه میشوند و جهت جریان درآنها به این صورت تعیین میشود که چنانچه به دلایلی جهت جریان خاصی دریك شاخه مد نظر باشد، به طور مثال بخاطر توپوگرافی منطقه یا وجود پمپ، همان جهت انتخاب میشود، در غیراینصورت ضابطه تعیین جریان در این شاخه ها به این صورت است:

فاصله هر گره واقع بردرخت کوتاهترین مسیر از منبع مشخص است. بر روی شاخه ای که باید به درخت اضافه شود، یك نقطه تعادل به گونه‌ای بدست میآوریم که فاصله آن از منبع از هر دو طرف برابر باشد. در این نقطه یك گره جدید فرض میکنیم. جهت جریان از طرف هر گره به طرف این گره جدید است. برای اجتناب از زیاد شدن تعداد گره ها، چنانچه فاصله گره جدید از یکی از گره‌ها کمتر از مقدار معینی (بطور مثال ۲۰٪ طول لوله) باشد، گره جدید را اضافه نکرده و جهت جریان از طرف گره با کمترین فاصله از منبع بطرف گره با بیشترین فاصله تعیین میشود.

با بدست آمدن درخت توزیع بهینه جریان درهر شاخه را میتوان حساب کرد. جریان درهر شاخه باید حداقل به اندازه مصرف در طول آن لوله باشد. مصرف هر گره باید از کوتاهترین مسیر به آن برسد بامشخص شدن جهت ها و جریانها میتوان قطرهای بهینه را تعیین کرد. با معلوم شدن جریان لوله ها یعنی q_{ij} تنها متغیر تصمیم قطر لوله ها در مدل (۳) باقی می ماند و محدودیتهای دوم و سوم حذف میشوند. محدودیتهای مربوط به فشار که برای هر گره روی مسیرها منتهی به گره نوشته میشوند، زیادند و کارایی حل مدل را فوق العاده کاهش میدهند. هرچه از تعداد محدودیتها کاسته شود، سرعت حل مدل افزایش می یابد. برای اینکار معادلات مربوط به رعایت حد مجاز پائینی را برای گره هایی که‌دارای بیشترین فشار مجاز می نیم هستند می نویسیم، بطوریکه مسیرهای منتهی به انها شامل تعداد زیادی از گره های شبکه باشند. نوشتن محدودیت مینیمم فشار برای یك گره باعث میشود که افت فشارها درآن مسیر کم شود، چون معادلات مربوط به صفر شدن جمع جبری افت فشارها درهر حلقه در مدل وجود دارد، کم کردن افت فشارها در یك مسیر روی دیگر شاخه های شبکه نیز اثر میگذارد. بنابراین میتوان کفت نوشتن رابطه محدودیت مینیمم فشار در مدل برای تمامی گره های شبکه لزومی ندارد. چون مدل سعی در کمینه کردن قطرها که معادل افزایش فشار است دارد، دراکثر موارد نیازی به نوشتن محدودیت ماکزیمم فشار در گره و حدود بالایی قطرها نیست. حدود قطر لوله ها طبق رابطه ای که بین قطر و حدود بالا و پائین سرعت بدست آمده است و نیز اینکه قطر لوله های موجود دربازار محدود است، بدست میآیند.

از نتایج تحلیلهای فوق مدل زیر حاصل میشودوبا حل آن قطرهای بهینه بدست میآیند:

$$\min \sum_i \sum_j K_1 L_{ij} X_{ij}^2 \qquad ^{۱۴}$$

$$\text{S.t.} \begin{cases} \sum_{(i,j) \epsilon \text{Loop}_E} h_{ij} = \quad E = 1, \ldots, M \\ \sum_{(i,j) \epsilon S_j} h_{il} \leqslant H_l - H_{minj} \quad j \epsilon (2, \ldots, K) \\ \text{Max} \left(D_{min}, \left(\frac{4 q_{ij}}{\pi V_{max}}\right)^{1/2}\right) \leqslant X_{ij} - \\ \leqslant \text{Min} \left(D_{max}, \left(\frac{4 q_{ij}}{\pi V_{min}}\right)^{1/2}\right) \end{cases} \qquad :(۱۴)$$

که درآن D_{min} کوچکترین قطر مورد استفاده و D_{max} بزرگترین قطر موجود دربازار هستند. از این روش توسعه سیستمهای موجود نیز میتوان استفاده کرد.

گامهای روش پیشنهادی بدین صورت است :

۱ ـ تعیین درخت کوتاهترین مسیر از منبع به گره های شبکه .

۲ ـ اضافه کردن شاخه های باقیمانده به درخت برای ایجاد حلقه و ایجاد گره های جدید در صورت لزوم براساس معیارهای گفته شده .

۳ ـ تعیین جهت جریان از منبع به طرف سر ـ شاخه ها و بدست آوردن مقدار جریان در هرشاخه.

۴ ـ در صورتی که پروژه ایجاد شبکه جدید است به گام ۷ می رویم و اگر پروژه توسعه سیستم موجود است ادامه میدهیم .

۵ ـ تغییر مقادیر جریان و جهت جریانهای بدست آمده برای ایجاد تعادل هیدرولیکی در شاخه های موجود شبکه .

۶ ـ تعیین اینکه در کدام شاخه موجود ، جریان ازحد کشش قطر موجود بیشتر بوده (با ضرب حداکثر سرعت در سطح مقطع) واحتیاج به تقویت دارد.

۷ ـ حل مدل (۱۴) و بدست آوردن قطرهای بهینه.

۸ ـ در حالت توسعه سیستم موجود ، با بدست آمدن قطر بهینه شاخه از گام ۷، افت فشاردر هر شاخه مشخص میشود. با معلوم شدن h_L و معلوم بودن قطر لوله موجود DE مقدار جریانی که از لوله موجود عبور میکند (q_1) از رابطه زیر حساب میشود:

$$q_1 = (h_L\, C_{HW}^{1.85}\, DE^{4.87})/(K_{HW}\, L)^{1/1.85}$$

با معلوم شدن q_1 از رابطه فوق و معلوم بودن جریان بین دوگره ، مقدارجریان درشاخه ای که باید اضافه شودبدست مآید(q_2).اکنون میتوانیم قطرلوله تقویتی(D_2)رابه این ترتیب بدست آوریم:

$$D_2 = (h_L\, C_{HW}^{1.85})^{-1} (K_{HW}\, L q_2^{1.85})^{1/4.87}$$

۹ ـ تبدیل قطرهای بدست آمده بقطرهای موجود در بازار ، با بدست آمدن قطر بهینه از حل مدل دو قطر استاندارد تجاری نزدیك به این قطر را پیداکرده (یکی از بزرگتر و دیگری کوچکتر) و طول شاخه را به دو قسمت با این دو قطرتقسیم‌کرده بطوریکه جمع افت فشار در این دو قسمت برابرافت فشار معادل قطر بهینه بدست آمده از حل مدل باشد.

۲ ـ ۳ ـ توسعه مدل

مدل برای موارد زیر نیز کامل شده است :

ـ درنظرگیری بارآتش نشانی :

ـ در حالتی که پمپ نیز در شبکه موجود باشد و بخواهیم ظرفیت بهینه پمپ و قطر بهینه لوله ها را پیدا کنیم .

ـ یافتن فشار بهینه منبع و قطر بهینه لوله ها در حالتی که فشار منبع مجهول و قابل تغییر باشد.

ـ اصلاح روش و نحوهٔ تجزیه مسئله برای حالتی که مسئله مربوط به شبکه های بزرگ بوده و برای حل مدل برنامه ریزی غیر خطی با کمبود حافظهٔ کامپیوتر مواجه شویم .

در اینجا تکمیل مدل برای درنظر گیری بار آتش نشانی توضیح داده میشود. برای درنظرگیری جریان آتش نشانی در مدل ، به این نکته توجه میکنیم که وقتی قطر ثابت باشد و جریان زیاد شود سرعت آب افزایش پیدا میکند . بنابراین نتیجه میگیریم که برای انعطاف پذیر بودن سیستم‌درحالت آتش نشانی باید سرعت آب درحالت با بار آتش ـ نشانی از حد مجاز بیشتر نشود، در نتیجه قطر لوله باید به اندازه ای باشد که بتواند این مقصود را تأمین کند. برای درنظر گرفتن جریان آتش ـ نشانی در مدل ، در حد پائینی X_{ij}درمدل، V_{max} را اصلاح میکنیم . جریانهای آتش نشانی به شبکه اضافه میشوند، جریان در اینحالت را q_f وجریان در حالت معمولی را q_n می نامیم . سرعت در حالت

آتش نشانی را برابر ۲ متر برثانیه درنظر میگیریم. حال V_{max} به این ترتیب بدست میآید:

جریان	سرعت	
q_F	۲	$V_{max} = \frac{۲ q_N}{q_F}$
q_n	V_{max}	

با بدست آوردن V_{max} از تناسب فوق مشاهده میشود در اینحالت با کم شدن V_{max} ، حدپائینی X_{ij} زیاد شده و امکان انعطاف پذیری سیستم در حالت بارگذاری با جریان آتش نشانی ایجاد میشود.

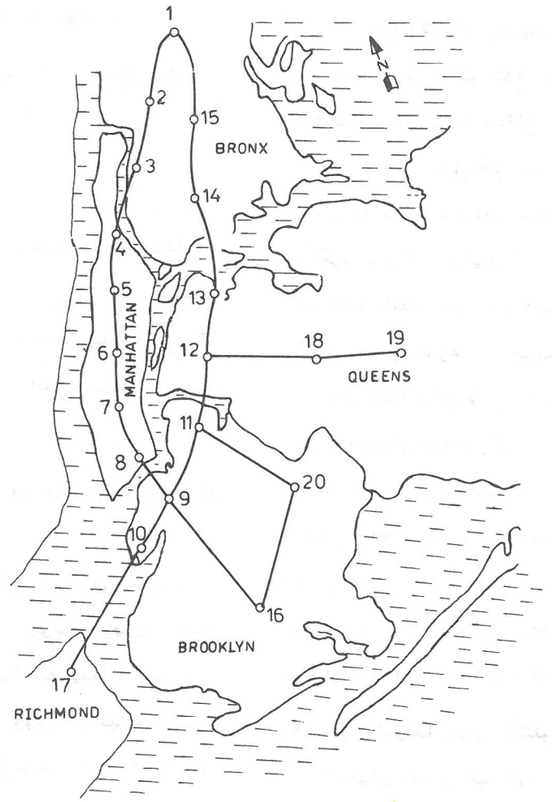
۳ ـ مقایسه روش پیشنهادی با روشهای بهینه سازی قبلی

مدلسازی های قبلی که برخی از آنان بیان شد، همگی مبتنی برمدلسازی بصورت برنامه ریزی خطی بوده اند و به همین دلیل ناچارا" تقریبهای زیادی در مدل وارد شده است . در روش پیشنهادی از مدل سازی غیر خطی استفاده شده است . ایده استفاده از کوتاهترین مسیر برای تعیین جهت و مقدار جریانها در روش ابتکاری«بی ها و نیز»مورداستفاده قرار گرفته است ، البته نه بصورتی که در روش این مقاله پیشنهاد شده است . مدل برنامه ریزی غیر خطی استفاده شده نیز کاملا" جدید و ابتکاری بوده و تاکنون بدین صورت برای حل این مسئله استفاده نشده است . ویژگی دیگر روش ، مربوط به در نظرگیری بارآتش نشانی است . درمدلهای قبلی در نظرگیری جریان آتش نشانی منجربه افزایش محدودیتهای مسئله میشود، یعنی اگر در حالت معمولی چهل محدودیت وجود داشته باشد، در حالتی که دو الگوی تقاضا داشته باشیم ، هشتاد محدودیت وجود خواهند داشت . ولی در روش پیشنهادی داشتن دو دو الگوی تقاضا هیچ اثری روی تعداد محدودیتها ندارند و طبق آنچه قبلا" ذکر شده اثر این جریان در حداکثر سرعت مجاز تأثیر داده میشود واز روی حداکثر سرعت مجاز ، حد پائینی X_{ij} تغییرمیکند.

در هیچ یك از روشهای قبلی ، سرعت آب بطور مستقیم در مدل اثر نداشته است و تضمینی برای رعایت حداکثر و حداقل سرعت مجاز آب درلوله ها وجود ندارد. دلیل این امر این بوده که اگر سرعت را وارد مدل میکردند منجر به غیر خطی شدن مدل میگردید و از مزایای خطی بودن مدل نمیتوانستند استفاده کنند. در مدل پیشنهادی باتوجه به‌رابطه ای که باید بین سرعت ، جریان و سطح مقطع وجود دارد و استانداردهایی که برای حداکثر و حداقل سرعت مجاز آب در لوله ها و نیز سرعت اقتصادی وجود دارد ، برای قطر هر لوله حدود بالایی و پائینی تعیین شده است . این امر نه تنها منجر به وارد شدن محدودیت سرعت درمدل شده ، بلکه به مدلسازی نیز کمك بسیاری کرده است . درمدل سازی های قبلی به این نکته توجه نشده است .

۴ ـ حل مثال با روش پیشنهادی

تونلهای تأمین آب شهر نیویورك (شکل ۱)موضوع یك سری مطالعات طولانی برای تعیین اقتصادی‌ترین طرح جهت توسعه سیستم موجود بوده است . قسمتی از این کار ، مسئله ایجاد لوله هایی به موازات لوله های موجود برای تقویت شبکه بوده است . این مسئله اولین بار توسط لای وشاکه با مدل پیشنهادی شان حل شد. افراد دیگری هم که در زمینه بهینه سازی شبکه های توزیع آب کار کرده اند روش خود را با حل این مسئله مورد سنجش قرار داده اند . نتایج کار کسانی که این مسئله را حل کرده اند به این شرح است : هزینه جواب لای وشاکه (۱۹۶۹) ۷۸/۱ میلیون دلار ، هزینه جواب روش کوین دری وهمکاران (۱۹۷۹) ۶۳/۶ میلیون دلار جواب با روش کسلر و ـ والسکی (۱۹۸۲) ۱۴/۸میلیون دلار هزینه داشته است . جواب روش مورگان و گولتر برای حالتی که برای هر شاخه از یك قطر استفاده شود ۳۹/۲



شکل شماره (۱) : تونلهای تأمین آب شهرنیویورک

میلیون دلار و در حالتی که مدل استفاده شده بتواند برای هر شاخه ، از دو تکه لوله با قطرهای متفاوت استفاده کند ۳۸/۹۹ میلیون دلار است . جدول ۱ جوابهای بدست آمده با روش مورگان و گولتر را نشان میدهند.

در اینجا این مسئله را با روش پیشنهادی حل میکنیم .جداول ۲ و ۳ اطلاعات مورد نیاز را نشان میدهند. با انجام گامهای ۱ و ۲ روش ، درخت توزیع جریان بدست میآید یك گره جدید (گره (۲) بین گره ۱۶ و ۲۰ ایجاد میشود. طول ۲۱ ـ ۱۶ ، ۸۵۰۰ فوت و طول شعبه ۲۱ ـ ۲۰ ، ۲۹۹۰۰ فوت هستند. با انجام گامهای روش و حل مدل (۲۰ برای این مسئله قطرهای بهینه برای توسعه شبکه بدست میآید. جواب بدست آمده در جدول ۴ آمده است . همانطورکه ملاحظه میکنید باجواب بدست آمده از روش پیشنهادی این مقاله، هزینه کل توسعه شبکه ۳۸/۸۹ میلیون دلار میشود که از تمامی روشهای قبلی کمتر است .محاسبه هزینه شبکه براساس هزینه هایی که از منبع ۱۰ اقتباس شده میباشد.

شماره لوله	شماره گره شروع	شماره گره ختم	جواب درحالت دوقطر برای هر لوله: طول (فوت)	جواب درحالت دوقطر برای هر لوله: قطر لوله اضافه شده	جواب درحالت بایك قطر: طول	جواب درحالت بایك قطر: قطر لوله اضافه شده
۷	۷	۸	۹۶۰۰	۱۴۴	۹۶۰۰	۱۴۴
۱۶	۱۰	۱۷	۲۳۴۳۲۰/۸ ۲۹۶۷/۹۲	۹۶ ۱۰۸	۲۶۴۰۰	۹۶
۱۷	۱۲	۱۸	۳۱۲۰۰	۹۶	۳۱۲۰۰	۹۶
۱۸	۱۸	۱۹	۵۷/۹۹ ۲۳۹۴۳/۰۱	۷۲ ۸۴	۲۴۰۰۰	۸۴
۱۹	۱۱	۲۰	۴۵۲۷/۷۶ ۹۸۷۲/۲۴	۴۸ ۶۰	۱۴۴۰۰	۶۰
۲۰	۲۰	۱۶	۳۴۹۲/۸۹ ۲۲۹۰۷/۱۱	۷۲ ۸۴	۲۶۴۰۰	۸۴

جدول شماره(۱): جوابهای مسئله توسعه شبکه شهر نیویورك باروش مورگان وگولتر

گره	کمترین فشارمجازبرحسب فوت	تقاضا بر حسب فوت مکعب در ثانیه
۱	۳۰۰	-۲۰۱۷/۵
۲	۲۵۵	۹۲/۴
۳	۲۵۵	۹۲/۴
۴	۲۵۵	۸۸/۲
۵	۲۵۵	۸۸/۲
۶	۲۵۵	۸۸/۲
۷	۲۵۵	۸۸/۲
۸	۲۵۵	۸۸/۲
۹	۲۵۵	۱۷۰/۰
۱۰	۲۵۵	۱/۰
۱۱	۲۵۵	۱۷۰/۰
۱۲	۲۵۵	۱۱۷/۱
۱۳	۲۵۵	۱۱۷/۱
۱۴	۲۵۵	۹۲/۴
۱۵	۲۵۵	۹۲/۴
۱۶	۲۵۵	۱۷۰/۰
۱۷	۲۷۲/۸	۵۷/۵
۱۸	۲۵۵	۱۱۷/۱
۱۹	۲۵۵	۱۱۷/۱
۲۰	۲۵۵	۱۷۰/۰

جدول شماره (۲) : اطلاعات مربوط به گره ها

شماره لوله	شماره گره شروع	شماره گره ختم	طول (فوت)	قطر لوله موجود (اینچ)
۱	۱	۲	۱۱۶۰۰	۱۸۰
۲	۲	۳	۱۹۸۰۰	۱۸۰
۳	۳	۴	۷۳۰۰	۱۸۰
۴	۴	۵	۸۳۰۰	۱۸۰
۵	۵	۶	۸۶۰۰	۱۸۰
۶	۶	۷	۱۹۱۰۰	۱۸۰
۷	۷	۸	۹۶۰۰	۱۲۲
۸	۸	۹	۱۲۵۰۰	۱۲۲
۹	۹	۱۰	۹۶۰۰	۱۸۰
۱۰	۱۰	۱۱	۱۱۲۰۰	۲۰۴
۱۱	۱۱	۱۲	۱۴۵۰۰	۲۰۴
۱۲	۱۲	۱۳	۱۲۲۰۰	۲۰۴
۱۳	۱۳	۱۴	۲۴۱۰۰	۲۰۴
۱۴	۱۴	۱۵	۲۱۱۰۰	۲۰۴
۱۵	۱۵	۱	۱۵۵۰۰	۲۰۴
۱۶	۱۰	۱۷	۲۶۴۰۰	۷۲
۱۷	۱۲	۱۸	۳۱۲۰۰	۷۲
۱۸	۱۸	۱۹	۲۴۰۰۰	۶۰
۱۹	۱۱	۲۰	۱۴۴۰۰	۶۰
۲۰	۲۰	۱۶	۲۸۴۰۰	۶۰
۲۱	۹	۱۶	۲۶۴۰۰	۷۲

جدول شماره (۳) : اطلاعات مربوط به لوله ها

شماره لوله	شماره گره شروع	شماره گره ختم	قطر و طول لوله های اضافه شده D_1	L_1	D_2	L_2	هزینه
۱	۱	۲	۱۵۶	۵۲۶۴	۱۶۸	۶۳۳۶	۷۰۴۱۶۸۰
۱۷	۱۲	۱۸	۹۶	۲۷۴۱۱	۱۰۸	۳۷۸۹	۱۰۰۴۴۸۶۱
۱۸	۱۸	۱۹	۷۲	۵۱۴۱	۸۴	۱۸۸۵۹	۶۱۷۱۵۱۴
۱۹	۱۱	۲۰	۶۰	۱۷۸۸	۷۲	۱۲۶۱۲	۳۱۰۱۹۴۰
۲۱	۹	۱۶	۶۰	۷۱۷۱	۷۲	۱۹۲۲۹	۵۵۱۱۷۰۵
۱۶	۱۰	۱۷	۷۲	۶۶۸	۸۴	۲۵۷۳۲	۷۰۱۸۰۷۲
						جمع :	۳۸۸۹۷۷۲

جدول شماره (۴) : جوابهای مثال باروش پیشنهادی

1- Operations Research
2- Lai, Schake
3- Brill, Libman
4- Morgan, Goulter
5- Gessler, Waleski
6- Bhave

۷ ـ هدف کمینه کردن قیمت شبکه توزیع است که در اینجا مجموع هزینهٔ لوله های شبکه میباشد. قیمت هر شاخه لوله نیز طبق روابط فوق تابعی از طول لوله و توان دوم قطر آن است .

۸ ـ متغیر تصمیم : متغیرهایی است که مقادیر بهینه آنها با حل مدل برنامه ریزی ریاضی بدست میآید.

۹ ـ Distribution tree: منظور از درخت توزیع دراینجا، شبکه ای است که جهت ومقدار جریان آب درهر شاخه آن مشخص است .

۱۰ ـ به این معنا است که آب، مسیری در شبکه، از منبع به محل مصرف را طی کند که کوتاهترین فاصله راداشته باشد.

۱۱ ـ متغیر تصمیم در مدل ۸ ، q_{ij} ، مقدار جریان در شاخه i-j است .

۱۲ ـ Spanning tree : درخت گسترش زیر شبکه ای است که دوخاصیت زیر رادارد :

۱) هرگره درشبکه توسط دنباله ای از کمانهای زیر شبکه به هرگره دیگر متصل میشود، وقتیکه جهت کمانها درنظر گرفته نشود.

۲) زیر شبکه فاقد حلقه است ،که حلقه دنباله ای ازکمانهاست که یك گره را بخودش متصل میکند . وقتیکه جهت کمانها درنظر گرفته نشوند.

۱۳ ـ Shortest path tree : شاخه های مسیرهایی که با کوتاه ترین فاصله گره منبع را به دیگر گره های شبکه متصل میکند. درخت کوتاه ترین مسیر را تشکیل میدهند.

۱۴ ـ حد مجاز : حدی است که طبق استانداردهای موجود برای حداکثر سرعت آب در لوله درنظرگرفته شده است . (حدود $2\ m/s$)

۱۵ ـ چون مقدار K_1 برای تمام لوله ها برابر است نیازی به دانستن این مقدار ثابت درمدل بهینه سازی نیست و حذف آن اثری روی مقادیر بهینه قطرها (X_{ij}) ندارد □

منابع و مآخذ

الف : منابع فارسی :

۱ ـ آشفته ، جلال : " طراحی آبرسانی شهری " .

۲ ـ آشفته ، جلال : " آنالیز، طرح و محاسبه هیدرولیکی خطوط انتقال و شبکه های توزیع آب " ، انتشارات فنی حسینیان ، تهران ، ۱۳۶۳.

۳ ـ امینی ، علی : " استفاده از مدل ریاضی برای طراحی بهینه شبکه های توزیع آب شهری " مجله آب ، آذر ۱۳۶۳ .

۴ ـ جیسون ، رولاند : " تحلیل هیدرولیکی شبکه های توزیع آب با استفاده از ربز کامپیوترها" ، ترجمه امین علیزاده ، محمود نقیب زاده و جلال جوشن ، بنیاد فرهنگی رضوی ، ۱۳۶۷.

۵ گسلر ، جان و والسکی : " انتخاب بهترین قطر لوله ها در یك سیستم توزیع آب " ، ترجمه جواد شیرانی ، نشریهٔ کمیته تحقیقات آب و فاضلاب پائیز ۱۳۶۸.

۶ ـ معماریور ، باقر : " قطر اقتصادی لوله های آبرسانی " ، نشریه کمیته تحقیقات آب و فاضلاب اصفهان ، خرداد ۱۳۶۹ .

۷ ـ منزوی ، محمد تقی : " آبرسانی شهری " دانشگاه تهران " ، شهریور ۱۳۵۷ .

ب : منابع خارجی :

8- Alperovits, E and U.Shamir, " Design of optimal water distribution system ", water Resource Research, Dec.1977.

9- Bhave, P.R., " Non-Computer Optimization of Single Source Networks ", jour. Enviromental Eng., Aug. 1978.

10-Goulter,I.C., and Morgan, D.R., " Optimal Urban Water Distribution Design ", Water Resource Research,Vol.21,May 1987.

11-Quindry, G.E., Brill, E.D. and Liebman, J.C.,"Optimization of Looped Water Distribution System", Jour. Environmental Engineering, Aug. 1981.

12-Shamir, U., " Optimal Design and Operation of Water Distribution Systems ", Water Resource Research,Feb.1974.

13-Tung Liang, " Design Conduit Systems By Dynamic programming ", Jour. Hydrulic Divison, March 1971.

14-Waleski, T.M., " Battle of the Network Models",Jour.Water Resource Planning and Management, March 1987.