

1266P-NWWCE

تشخیص آلودگی عمدی و مخاطرات آن در شبکه توزیع آب (مروری)

محمدعلی عدالتی پور^۱، علی نصیریان^۲، حسین مهدیزاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه بیرجند

۲- استادیار دانشکده مهندسی، گروه عمران دانشگاه بیرجند

۳- استادیار دانشکده مهندسی، گروه عمران دانشگاه بیرجند

Mohammad.edalatipoor@birjand.ac.ir

خلاصه

در سالیان اخیر امنیت و نگرانی از سیستم‌های توزیع آب شهری به یک مسئله و نگرانی عمده برای مسئولین آب و فاضلاب تبدیل شده است. چرا که هر تهدید و خطری که بر روی منابع آب انجام شود مستقیماً مورد توجه مردمی قرار می‌گیرد که از آن استفاده می‌کنند. یکی از مهم‌ترین تهدیدها و خطرات، حملات عمدی به منظور آلوده کردن آب شبکه با آلاینده‌های شیمیایی و یا بیولوژیکی می‌باشد که می‌تواند جان بسیاری از افراد جامعه را مورد تهدید قرار دهد. راه‌ها و روش‌های گوناگون زیادی برای افزایش امنیت و محافظت از سیستم‌های توزیع آب آشامیدنی وجود دارد که می‌توان با استفاده از این روش‌ها امنیت شبکه را تضمین کرد. لذا در گام اول بایستی یک تصمیم مهم برای جلوگیری از گسترش آلودگی و حذف آن از شبکه گرفته شود. چرا که در این مواقع با گذشت زمان جان افراد بیشتری مورد تهدید قرار خواهد گرفت و این دیگر قابل جبران نخواهد بود؛ و همچنین این تصمیم اشتباه ممکن است باعث بحرانی‌تر شدن اوضاع و پخش بیشتر آلودگی در شبکه توزیع آب شود. در این تحقیق روش‌های مختلف جلوگیری از پخش آلودگی و راه‌های تشخیص مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: آلودگی آب، گسترش آلودگی، آلودگی عمدی، مخاطرات، شبکه توزیع آب

۱. مقدمه

در کشور ما مدیریت بحران به صورت علمی امری نوین است و اهمیت مهندسی پدافند غیرعامل در سال‌های اخیر بیشتر روشن شده است؛ بنابراین زمینه برای تحقیق و کار در این باره زیاد است. پدافند غیرعامل مجموعه اقدامات و تدابیری است که موجب کاهش آسیب‌پذیری نیروی انسانی، ساختمان‌ها و تأسیسات، تجهیزات و شریان‌های کشور در مقابل عملیات مخرب دشمن می‌گردد. شبکه‌های توزیع آب از جمله مهم‌ترین سرمایه‌ها و تأسیسات برای پیشرفت‌های تکنولوژیکی و حفظ سلامتی انسان‌ها می‌باشند و ضرورت حفاظت از آن‌ها بر کسی پوشیده نیست. پراکندگی و گستردگی زیاد شبکه‌ها باعث افزایش آسیب‌پذیری آن‌ها شده است. این تأسیسات در معرض دو نوع خطر کلی قرار دارند: ۱- مکانیکی، در اثر به وجود آمدن شکست و خرابی در یک یا چند جزء شبکه (مانند لوله‌ها، گره‌ها، تصفیه‌خانه‌ها، مخازن ذخیره آب) ۲- آلودگی، در اثر ورود مواد شیمیایی یا بیولوژیکی. این خطرها ممکن است به صورت طبیعی، عمدی و یا غیرعمدی ایجاد شوند.

در این مطالعه ورود آلودگی به صورت عمدی در شبکه‌های توزیع آب شهری مورد بررسی قرار می‌گیرد. حملات عمدی به شبکه‌های آب شهری را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: ۱- حملات سایبری؛ که در آن بخش کنترل و نظارت شبکه را مورد هدف قرار می‌دهند. ۲- حملات فیزیکی؛ که زیرساخت‌های شبکه مستقیماً مورد حمله فیزیکی قرار می‌گیرند ۳- حملات شیمیایی و بیولوژیکی؛ که به علت به خطر افتادن سلامت مردم خطرناک‌تر از بقیه می‌باشند. بعد از حملات تروریستی یازدهم سپتامبر، تحقیقات گسترده‌ای به منظور ایمن کردن شبکه‌های شهری آغاز شد و کشورهای زیادی راهبردهایی را برای نظارت بر کیفیت آب و اجرای اقدامات عملیاتی در شرایط اضطراری اتخاذ کردند. آلودگی عمدی آب‌ها در حملات می‌تواند سلامت افراد را به خطر بیندازد و پیامدهای جدی مانند ایجاد بیماری‌های کشنده و عفونی داشته باشد.

بعد از ورود آلودگی به شبکه آب، آلاینده بسته به مکان ورود آلودگی، نوع و میزان آلاینده، مدت زمان ورود آلاینده و عملکرد و نوع طراحی شبکه آب، می تواند مسافت کمی را طی کند و یا در بخش عظیمی از شبکه توزیع شود. نقاط زیادی در شبکه وجود دارد که آلودگی می تواند از طریق آن ها به شبکه وارد شود. از آنجا که حفاظت همه ی نقاط شبکه برای جلوگیری از ورود آلودگی امری غیرممکن است، بنابراین باید علاوه بر تلاش برای کاهش احتمال وقوع این رخدادهای، بر روی مدیریت شبکه توزیع آب در مواقع ورود آلودگی و کاهش اثرات ناشی از اینگونه رخدادهای تاکید بیشتری شود برخی از مشکلات در حفظ و نگهداری شبکه های توزیع آب می تواند ناشی از پیچیدگی های تکنیکی و مدیریتی، تنوع آلاینده ها، مشکلات تخمین پراکندگی آلاینده و سرعت بالای انتشار آن باشد که نیازمند نظارتی هماهنگ و سریع می باشد [۱].

شبیه سازی پاسخ به آلودگی پس از وقوع و تشخیص آن در شبکه به منظور بهینه سازی عکس العملها و اقدامات مقتضی، بسیار نوین بوده و تحقیقات بسیار کمی در این مورد انجام شده است. بارانوسکی و لیاف [2]، پریس و استفیلد [3] با استفاده از الگوریتم های فراکاوشی و دوریگو و همکاران [4] با استفاده از روشی ابتکاری مسئله مدیریت پیامد را مورد بررسی قرار دادند.

راهکارهای محدود کردن آلودگی و خارج کردن و یا از بین بردن آن در شبکه های آب شهری عبارتند از: ۱- شیرهای قطع و وصل به منظور محدود نمودن آلودگی ۲- باز کردن شیرهای آتشنشانی به منظور خروج آلاینده ۳- استفاده از مواد ضد عفونی کننده برای از بین بردن آلودگی در داخل شبکه ۳- استفاده از پمپ ها به منظور تسریع خروج آلودگی از شبکه ۵- ترکیبی از موارد فوق

این راهکارها، توصیه هایی عمومی بوده و لزوم ارائه روش هایی به منظور پیاده سازی آنها در رخدادهای واقعی که بیشترین تأثیر را در کاهش اثرات آلودگی داشته باشد، به چشم می خورد. با استفاده از این روش ها در هنگام وقوع آلودگی، مدیران شبکه قادر به انتخاب شیرهای قطع و وصل و آتش نشانی مناسب جهت ایزولاسیون و خارج کردن آلاینده از داخل شبکه خواهند بود [5].

به طور کلی تهدیدات موجود در زمینه آب عبارتند از:

حمله مستقیم دشمن با استفاده از هر نوع سلاح متعارف از قبیل بمب، موشک، خرابکاری تجهیزات و ...

آلودگی ثانویه ناشی از ریزش اجساد، ریزش سموم و ... درون منابع آبهای سطحی و زیرزمینی.

حوادث بزرگ ناشی از خطاها و اشتباهات فردی مانند نشت آب و رسیدن آن به سامانه برق رسانی و ...

بروز اختلال در سامانه های رایانه ای توسط عوامل انسانی یا حوادث طبیعی

قطع یا نقصان در ارائه خدماتی از قبیل آبرسانی و دفع شیرابه های سطحی و ...

اشتباه و اختلال در شناسایی منابع آبی موجود

عدم تأمین جایگزین مناسب و مطمئن منابع آبی

صدور اشتباهی قبوض آب

به مدت طولانی کم کردن فشار آب برخی مناطق توسط دستگاه اجرایی به خصوص در روزهای گرم تابستانی

بروز زلزله و تخریب تأسیسات آبرسانی

۲. روش های کشف آلودگی

روش هایی زیادی برای کشف رویداد آلودگی وجود دارد که می توان به جلبک ها، سنسورهای نانو لوله کربنی، سنسورهای زیستی، باکتری های هتروتروف، باکتری های آئروموناس و فرآیند اکسیداسیون پیشرفته نیز اشاره کرد.

۳. روش ها و مدل های پیش بینی حرکت و توزیع آلودگی در آب

پیش بینی حرکت آلودگی را می توان با استفاده از نرم افزار EPANET مدل کرد.

EPANET یک برنامه کامپیوتری است که رفتار هیدرولیکی و کیفی آب شبکه های لوله تحت فشار را در پریدهای زمانی تنظیم شده، شبیه سازی می کند. یک شبکه توزیع آب شامل لوله، گره (محل تقاطع لوله ها)، پمپ، شیر و تانک ذخیره می باشد .

EPANET جریان آب در هر لوله، فشار در هر گره، ارتفاع آب در هر تانک و غلظت یک ماده داخل شبکه توزیع در طی یک شبیه سازی با چندین پرید زمانی را ردیابی می کند. EPANET بعنوان یک ابزار تحقیق برای بهبود فهم ما از جابجایی و سرنوشت مواد تشکیل دهنده آب آشامیدنی داخل شبکه های توزیع، طراحی شده است. مدل کیفی EPANET می تواند پدیده هایی نظیر واکنش های درون جریان حجمی، واکنش های در دیواره لوله، و انتقال جرم بین جریان حجمی و دیواره لوله را مدل نماید [6].

۴. مروری بر کارهای صورت گرفته تاکنون (جدول ۱)

جدول ۱- روش های تک هدفه

تعداد سنسور	روش بهینه سازی	بررسی های صورت گرفته توسط دیگران	هدف
ثابت	IP	لی و همکاران [7]	پوشش تقاضا
متغیر	Heuristic	کومار [8]	پوشش تقاضا
ثابت	GA	وو و همکاران [9]	پوشش تقاضا
ثابت	IP	بری و همکاران [10]	حجم مصرفی
متغیر	Heuristic	افشار و همکاران [11]	حجم مصرفی
متغیر	Heuristic	استفلاذ [12]	حجم مصرفی

۵. بررسی اهداف

۵-۱ کمینه کردن عملیات اجرایی

منظور از عملیات اجرایی تعداد عملیات واکنشی توسط گروه های اعزامی به منطقه است که می تواند شامل باز یا بستن شیرها و شیرهای آتش نشانی و یا روشن کردن پمپ ها باشد. هرچه تعداد این عملیات بیشتر باشد هزینه عملیاتی و مشکلات مدیریتی افزایش خواهد یافت تعداد ادوات به کار گرفته شده در مدیریت بحران به صورت معادله (۱) تعیین می شود [13]:

$$F_1 = \sum_{k=1}^{VA} VA_K + \sum_{j=1}^{HY} HY_j + \sum_{i=1}^{PU} PU_i \quad (1)$$

F_1 : مجموع تعداد عملیات اجرایی

VA : تعداد کل شیرها

HY : تعداد کل شیرهای آتش نشانی

PU : تعداد پمپ های موجود در شبکه



اگر شیر K ام به منظور ایزوله^۱ کردن شبکه بسته شده باشد مقداری برابر با یک، و اگر باز باشد مقدار آن برابر با صفر خواهد بود. اگر شیر آتش نشانی J ام برای فلاشینگ^۲ باز باشد مقدار آن برابر با یک، و در غیر این صورت مقدار آن صفر خواهد بود. اگر پمپ روشن باشد مقداری برابر با یک و در غیر این صورت صفر خواهد بود [14].

۵-۲ کمینه کردن جرم آلاینده مصرف شده

با کمینه کردن جرم آلاینده مصرف شده، تعداد افراد در معرض آلودگی کاهش می یابد. کمینه کردن جرم آلاینده به صورت معادله (۲) تعیین می شود:

$$F_3 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=t_{cm}}^{EPS} c_i(t) \times v_i(t + \Delta t) \quad (2)$$

F_3 : جرم آلاینده مصرف شده

I : نشانگر گره

N : تعداد گره های مصرف شده

T : نشانگر زمان

T_{cm} : زمان شروع مدیریت بحران

EPS : کل مدت شبیه سازی

$C_i(t)$: غلظت آلاینده در گره i در زمان t

$V_i(t + \Delta t)$: حجم آب آلوده مصرف شده در گره i تا $t + \Delta t$

غلظت گره های آلوده در هر Δt یک بار خوانده می شود

۵-۳ کمینه کردن زمان بازگشت شبکه به حالت عادی

این هدف برای اولین بار توسط نجفی (۱۳۹۰) مورد بررسی قرار گرفت. از جمله نتایج رسیدن به این هدف می توان به از بین رفتن هر چه سریع تر تنش های ناشی از حمله، کاهش تعداد افراد در معرض استفاده از آب آلوده و کاهش بار روانی ناشی از آن اشاره کرد. که برای کمینه کردن می توان از معادله (۳) استفاده کرد:

$$F_4 = T \left(\sum_{i=1}^n N(i, T) \right) = 0 \quad (3)$$

T : زمانی که شبکه به حالت عادی برگشته است (یعنی زمانی که غلظت آلودگی در تمام گره های مصرف کننده از یک حد آستانه ای کمتر شده و تا پایان شبیه سازی در همین وضعیت باقی بماند).

1. isolated
2. Flushing

هرگاه غلظت گره مصرف کننده i در زمان t کمتر از حد آستانه مورد نظر برای آلودگی باشد $N(i,t)$ برابر با صفر و هرگاه بیشتر از این مقدار باشد برابر با یک منظوری شود [15].

۴-۵ کمینه کردن مجموع غلظت آلاینده در تمامی گره‌ها

بارانوسکی ولی بوف در سال ۲۰۰۸ کارهای زیر را برای رسیدن به این هدف انجام دادند:

۱- یافتن بهترین گره‌ها برای ایجاد تغییر تقاضا (فلاشینگ) در آن‌ها

۲- یافتن بهترین لوله‌هایی که باید بسته شوند.

آن‌ها در الگوریتم ژنتیک مقدار پرازندگی را به صورت زیر تعریف کردند:

$$total\ concentration_{detection} = \sum_{j=t_d, \dots, t_{end}}^{i=1, \dots, n} concentration_{i,j} \quad (4)$$

i : شماره گره

j : معرف زمان (از زمان تشخیص آلودگی تا پایان شبیه سازی) در نهایت روشی به بهترین جواب منجر شد که در آن ترکیبی از گره‌ها و لوله‌ها به طور همزمان مورد استفاده قرار گرفت.

۵-۵ تابع هزینه

به طور کلی اهداف به کار رفته در مسائل مدیریت پیامدهای ناشی از انتشار آلودگی، به سه دسته کمینه کردن تأثیرات نامطلوب بر روی سلامت جامعه، کمینه کردن هزینه عملیات اجرایی و کمینه کردن زمان اختلال در شبکه تقسیم بندی می شوند. تابع هزینه طبق معادله (۵) محاسبه می شود:

$$F_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=0}^{t_{end}} N(i, t) \quad (5)$$

که به ترتیب تعداد کل گره‌های مصرف کننده و پایان مدت زمان شبیه سازی می باشند. هرگاه غلظت گره i در زمان t کمتر از حد مجاز باشد $N(i,t)$ برابر با صفر و هرگاه مساوی و یا بیش از این مقدار باشد، برابر با یک منظور می شود. لازم به ذکر است که غلظت مجاز برابر با ۱،۱۵ میلی گرم بر لیتر می باشد. این رابطه در عین سادگی باعث کاهش وسعت آلودگی در شبکه شده و مدت زمانی که گره‌ها در بالای آستانه آلودگی هستند را کاهش می دهد. لازم به ذکر است که استفاده از مدل تک هدفه به علت زمان اندک مورد نیاز برای انجام محاسبات، در هنگام وقوع آلودگی و قرار گرفتن وضعیت شبکه در حالت اضطرار می تواند مفید واقع شود.

۶. مدل های پیشنهادی

۱- ابتدا شبیه سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب تحت الگوی مشخص تقاضا انجام می پذیرد (استفاده از نرم افزار EPANET)

۲- آلودگی در گره مورد نظر تزریق شده و زمان شروع مدیریت بحران مشخص می شود.

۳- شیرها، شیرهای آتش نشانی پمپ هایی که قرار است در مدیریت بحران مورد استفاده قرار گیرند مشخص می شوند.

۴- یک رشته جواب متشکل از این ادوات توسط بهینه ساز تولید می شود.



۵- با توجه به رشته جواب تولید شده تغییرات در شبکه اعمال می شود.

۶- شبکه با تغییرات صورت گرفته تحلیل می شود و غلظت آلودگی در تمام گره ها مشخص گردیده و جواب تولید شده با توجه به تابع هدف مورد نظر ارزیابی می شود.

۷- با تکرار مراحل ۴ تا ۶ بهینه ساز به سمت تولید جواب بهینه با توجه به تابع هدف مورد نظر پیش می رود.

۷. نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مطالعه مروری به توابع تک هدفه پرداخته شده است. مقالات زیادی در این زمینه وجود دارند با این تفاوت که توابع هدف را چند هدفه مورد بررسی قرار داده اند که با مقایسه آنها با توابع تک هدفه می توان به نتایج خیلی خوبی دست پیدا کرد. بنابراین می توان در تحقیقات بعدی اهداف را به صورت پیشرفته تر یا چند هدفه مورد بررسی قرار داد. همچنین می توان با اعمال یک سری تغییرات در شبکه تعداد کل گره های آلوده شده در شبکه را کاهش داد.

۸. منابع

1. Liu, L., Zechman, E. M., Mahinthakumar, G., & Ranji Ranjithan, S. (2012), "Identifying contaminant sources for water distribution systems using a hybrid method", *Civil Engineering and Environmental Systems*, 29(2), 123-13.
2. Baranowski, T. & LeBoeuf, E. (2006). Consequence Management Optimization for Contaminant Detection and Isolation. *Journal of Water Resour*, SPECIAL ISSUE: Drinking Water Distribution Systems Security, 274-282.
3. Preis, A., & Ostfeld, A. (2008). multi objective contaminant response modeling for water distribution systems security. *Journal of Hydroinformatics*, (10)4, 267-274.
4. Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colomi, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 26(1), 29-41.
5. Poulin, A., Mailhot, A., Grondin, P., Delorme, L., Periche, N., & Villeneuve, J. P. (2008), "Heuristic Approach for Operational Response to Drinking Water Contamination", *Journal of Resources Planning and Management*, 134(5), 457-465.
6. Poulin, A., Mailhot, A., Periche, N., Delorme, L., & Villeneuve, J. P. (2010), "Planning Unidirectional
7. B. H. Lee, R. A. Deininger, Optimal locations of monitoring stations in water distribution system, *J. Environ Eng.* 118 (1992) 4-16.
8. Kumar, M. L. Kansal, G. Arora, Detecting accidental contaminations in municipal water networks, *J. Water Resour Plan and Manage.* 125 (1999) 308-310.



کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران
دانشگاه تهران، تهران
۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



9. H-M. Woo, J-E. Yoon, D-Y. Choi, Optimal monitoring sites based on water quality and quantity in water distribution systems, in: Proc World Water and Environmental Resources Congress, ASCE, Reston, USA, 2001, pp.1-9.
10. J. W. Berry, L. Fleischer, W. E. Hart, C. A. Phillips, J-P Watson, Sensor placement in municipal water networks, J. Water Resour Plan and Manage. 131 (2005) 237-243.
11. A.Afshar, M. A. Marino, Multi-objective coverage-based ACO model for quality monitoring in large water networks, Water Resour Manage. 26 (2012) 2159-2176.
12. A. Ostfeld, E. Salomons, Securing water distribution systems using online contamination monitoring, J. Water Resour Plan and Manage. 131(2005) 402-405.
۱۳. نجفی (1391)، "مدیریت پیامدهای ناشی از حملات بیولوژیکی و شیمیایی به شبکه‌های توزیع آب شهری"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، تهران.
14. Daniels M; Methyl Tertiary-Butyl Ether (MTBE); www.idem.IN.gov; 2010
15. Davis, Lawrence and Erickson, Larry ; A Review of Bioremediation and Natural Attenuation of MTBE ; Wiley InterScience - DOI 10.1002/ep.10028 ; 2004.