Modeling of Chlorine Propagation in Drinking Water Systems

Samghabady, S.A. MSc., Sharif University of Technology

Tajrishi, M., Asist. Prof., Sharif University of Technology

Abrishamchi, A., Assoc. Prof., Sharif University of Technology

Abstract

Lack of chlorine used for the disinfection of contaminated water in water treatment may cause the outbreaks of diseases. On the other hand, high concentrations of chlorine in water consisting organic materials, may produce carcinogenic substances. Presence of biofilm in the interior surface of pipes and regrowth of coliform bacteria in the distribution networks would reduce residual chlorine substantially.

Simulation models can help to predict spatial and temporal distribution of residual chlorine in water distribution systems. By using such models, chlorine injection points and chlorine injection rates in the distribution networks are determined, such that, all nodes have adequate residual chlorine.

In this investigation, EPANET water quality model which uses first order equation ($C = C_0 e^{-Kt}$) was used for calculating chlorine decay and simulating residual chlorine in distribution network for the new city of Copiteh, Dezful.

By using the results the this simulation, spatial and temporal distribution of residual chlorine, optimum quantity for chlorine injection and a sampling point monitoring program was submitted for assessing residual chlorine for this distribution system.

Likewise, network quality status was analysed in different cases, e.g., using of satellite chlorinator and aging of pipes due to passage of time.

کاربرد مدلهای ریاضی شبیه‌سازی کلر باقیمانده در شبکه‌های توزیع آب شهری

افسرالملوک صفی صمغ‌آبادی* مسعود تجریشی** احمد ابریشم‌چی***

چکیده

بررسیها نشان می‌دهد که در حال حاضر معیار مناسبی برای تزریق کلر به شبکه‌های توزیع آب شهری وجود ندارد. تزریق کم کلر، باعث وقوع اپیدمی‌های متعدد در مصرف کنندگان آب آشامیدنی شده است و تزریق زیاد کلر، علاوه بر غیر اقتصادی بودن، احتمال تشکیل تری‌هالومتانها و خطر سرطانزایی را در بر دارد.

هدف از این مقاله، معرفی و کاربرد یک مدل ریاضی است که می‌تواند توزیع مکانی و زمانی کلر باقیمانده را در شبکه‌های توزیع آب پیش‌بینی نماید. با استفاده از این مدل می‌توان ضمن تعیین تزریق بهینه کلر، مقدار کلر در شبکه‌های توزیع را در حدود مجاز نگه داشت.

در این مقاله، با استفاده از مدل ریاضی EPANET، قسمتی از شبکهٔ توزیع آب شهر جدید کوپیته واقع در شمال شرقی شهر دزفول، شبیه‌سازی شده و ضمن نمایش توزیع زمانی و مکانی کلر باقیمانده، تزریق بهینه گشته و طرح نمونه‌برداری به منظور سنجش کلر باقیمانده برای شبکهٔ توزیع این شهر ارائه شده است. همچنین وضعیت توزیع کلر باقیمانده در شبکه در حالتهای مختلف، نظیر استفاده از کلرناتورهای تقویتی، کهنه شدن لوله‌ها بر اثر گذشت زمان و ... بحث شده است.

مقدمه

تحلیل هیدرولیکی و کیفی حتی یک شبکهٔ کوچک نیز نیاز به محاسبات زیادی دارد که بدون استفاده از کامپیوتر، کاری بسیار دشوار و وقت‌گیر است. امروزه محاسبهٔ شبکه‌ها به وسیله کامپیوتر انجام می‌گیرد و مدلهای ریاضی زیادی برای شبیه‌سازی رفتار کمّی (هیدرولیکی) و کیفی آب در شبکه‌های توزیع نوشته شده است. جدول ۱ وضعیت مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب را از دهۀ ۱۹۳۰ به بعد نشان می‌دهد [۱ و ۱۲]. همان طور که مشاهده می‌شود، نوشتن مدلهای کیفی از اواسط دهۀ ۱۹۸۰ آغاز شده و تا کنون ادامه دارد.

* - کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست دانشگاه صنعتی شریف
** - استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف
*** - دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

جدول ۱ - تاریخچهٔ مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب

زمان	وضعیت مدل‌سازی
دهه ۱۹۳۰	تحلیل جریان در شبکه به روش هاردی‌کراس
دهه ۱۹۶۰	تحلیل کامپیوتری شبکه‌ها
دهه ۱۹۷۰	مدلهای هیدرولیکی قابل دسترس فراوان برای مینی و میکروکامپیوترها
دهه ۱۹۸۰	مدلهای کیفی آب، جریان دائمی
سال ۱۹۸۵	مدلهای کیفی آب، جریان دینامیکی
دهه ۱۹۹۰	سیستمهای یک‌پارچه مدل‌سازی و نقشه کشی

مدلهای هیدرولیکی

مدلهای هیدرولیکی برای شبیه‌سازی دبی جریان، جهت جریان و فشار در شبکه‌های توزیع آب به‌کار می‌روند. این مدلها به دو نوع کلی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- مدلهای هیدرولیکی جریان دائمی: در این مدلها، مصرفها، پمپاژ چاهها، جریان تانکها، فشارها و نیز سطح آب در مخازن در طول زمان شبیه‌سازی ثابت‌اند. به بیان دیگر، مدل قادر به حل شبکه برای شرایط خاص یک لحظه، همچون حداکثر مصرف ساعتی است و نتایج آن برای لحظات دیگر، معتبر نیست.

۲- مدلهای هیدرولیکی دینامیکی: در این مدلها، تولید و مصرف آب با زمان تغییر می‌کنند.

مدلهای کیفی [۱۲، ۱۴ و ۱۵]

مدلهای کیفی برای شبیه‌سازی تغییرات غلظت مواد محلول در شبکه‌های توزیع آب به‌کار می‌روند. این مدلها به دو نوع کلی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- مدلهای کیفی جریان دائمی و مدلهای ردیابی جریان: این مدلها جابه جایی مواد محلول، مسیر جریان و زمان حرکت را در داخل شبکه توزیع تحت شرایط هیدرولیکی استاتیکی تعیین می‌کنند. برای نمونه می‌توان به مدلهای کلارک و همکاران[1] (۱۹۸۸)، مورفی[2] (۱۹۸۵)، میلز و همکاران[3] (۱۹۸۵)، چان و سلزنیک[4] (۱۹۸۵)، فولر و جونز[5] (۱۹۹۱)، وود و ارمسبی[6] (۱۹۸۵)، شاه و سینایی[7] (۱۹۸۸) و بولوس و همکاران[8] (۱۹۹۲ و ۱۹۹۳) اشاره کرد.

۲- مدلهای کیفی دینامیکی[9]: این مدلها تغییرات غلظت مواد محلول در آب را تحت شرایط هیدرولیکی متغیر با زمان تعیین و پیش‌بینی می‌کنند. برای نمونه می‌توان به مدلهای گری‌مان و همکاران[10]، (۱۹۸۸)، لیو و کرون[11] (۱۹۸۷)، هارت و همکاران[12] (۱۹۸۷)، شاه[13] (۱۹۸۵)، بولوس و همکاران[14] (۱۹۹۴ و ۱۹۹۵)، راس من و همکاران[15] (۱۹۹۳)، کوهن[16] (۱۹۹۱) و شادری و ایزلام[17] (۱۹۹۴) اشاره کرد.

از آنجایی که شبکه‌های توزیع آب و واکنشهای داخل آنها به زمان و غلظت بستگی دارند، مدلهای دینامیکی تعریف واقع بینانه‌تر و دقیق‌تری از سیستم واقعی و رفتار هیدرولیکی و کیفی آب ارائه می‌کنند. لازم به ذکر است که مدلهای هیدرولیکی و مدلهای کیفی آب می‌توانند با یکدیگر تلفیق شوند، یا اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی یک مدل هیدرولیکی خارجی ممکن است به عنوان اطلاعات و داده‌های ورودی به مدل کیفی استفاده شود.

از آنجایی که در حال حاضر معیار مناسبی برای تزریق کلر

1- Clark et al.
2- Murphy
3- Males et al.
4- Chun and Selznick
5- Fowler and Jones
6- Wood and Ormsbee
7- Shah and Sinai
8- Boulose et al.
9- Dynamic Water Quality Models
10- Grayman et al.
11- Liou and Kroon
12- Hart et al.
13- Shah
14- Boulose et al.
15- Rossman et al.
16- Cohen
17- Chaudhry and Islam

به شبکه‌های توزیع آب شهری وجود ندارد [۳، ۴ و ۵]، استفاده از مدلهای کیفی و دینامیکی برای تعیین تزریق بهینه کلر توصیه می‌شود.

معرفی بعضی از مدلهای کیفی موجود

جهت اختصار برخی از مدلهای کیفی موجود فقط نام برده می‌شود و در بارهٔ مدل EPANET که در این مطالعه موردی استفاده شده است، توضیح مختصری داده می‌شود. توصیف و بحث مبادلات مورد استفاده در این مدلها در مقالهٔ صفی‌صمغ آبادی و همکاران [۶] ارائه شده است.

۱- مدلهای توصیف شده در دانشکده فنی ورسستر[1] توسط هارت و همکاران: مدل CLNET، مدل BACNET [۷ و ۱۰].

۲- مدل توصیف شده در AWWA توسط لیو و همکاران [۱۳].

۳- مدل نوشته شده در توکیو - ژاپن برای کنترل پیشرفته تزریق کلر [۹].

۴- مدل شبیه سازی کلر با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی [۲۰]..

۵- مدل توصیف شده در EPA توسط کلارک و همکاران: مدل DWQM، مدل EPANET [۱۱، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹].

مدل کیفی دینامیکی EPANET (۱۹۹۷-۱۹۹۴)

EPANET یک برنامهٔ کامپیوتری است که رفتار هیدرولیکی و کیفی آب را در شبکه‌های لوله تحت فشار در طول یک دورهٔ زمانی، شبیه‌سازی می‌کند [۸]. یک شبکه می‌تواند از لوله‌ها، گره‌ها، پمپها، شیرها و تانکهای ذخیره[2] یا مخازن[3] تشکیل شده باشد. همچنین EPANET می‌تواند آب خارج شده از یک منبع را ردیابی کرده و به استفاده‌کننده از مدل بگوید در یک لحظه مشخص، چقدر آب از یک منبع تأمین آب به یک مکان معین می‌رسد.

از خصوصیات برجستهٔ EPANET، هماهنگی آن برای مدل کردن کیفیت آب و هیدرولیک شبکه است. این برنامه می‌تواند هر دو وضعیت را به طور همزمان حل و محاسبه نماید.

همچنین EPANET می‌تواند تنها هیدرولیک شبکه را حل کند و نتایج را داخل یک فایل ذخیره نماید، یا از یک فایل هیدرولیکی که قبلاً ذخیره شده، برای شبیه‌سازی کیفیت آب استفاده نماید. همچنین می‌تواند با استفاده از تبدیل ساز KYP2EPA از داده‌های برنامه KYPIPE (که تحلیل هیدرولیکی شبکه را انجام می‌دهد) به عنوان داده ورودی استفاده نماید.

EPANET می‌تواند در ارزیابی تدبیرهای مدیریتی مختلف برای اصلاح و بهبود کیفیت آب داخل یک سیستم آب شهری کمک کند. این تدبیرها عبارتنداز:

- تغییر در بهره‌برداری منبعهای آب در سیستمهای چند منبعی).
- تغییر پمپاژ و برنامه زمانی پر یا خالی شدن تانک.
- استفاده از دستگاه تصفیه تقویت کننده، نظیر کلریناسیون مجدد در تانکهای ذخیره.
- تعویض و یا تمیزکردن لوله‌هایی که از لحاظ میکروبی مورد هجوم واقع شده‌اند.

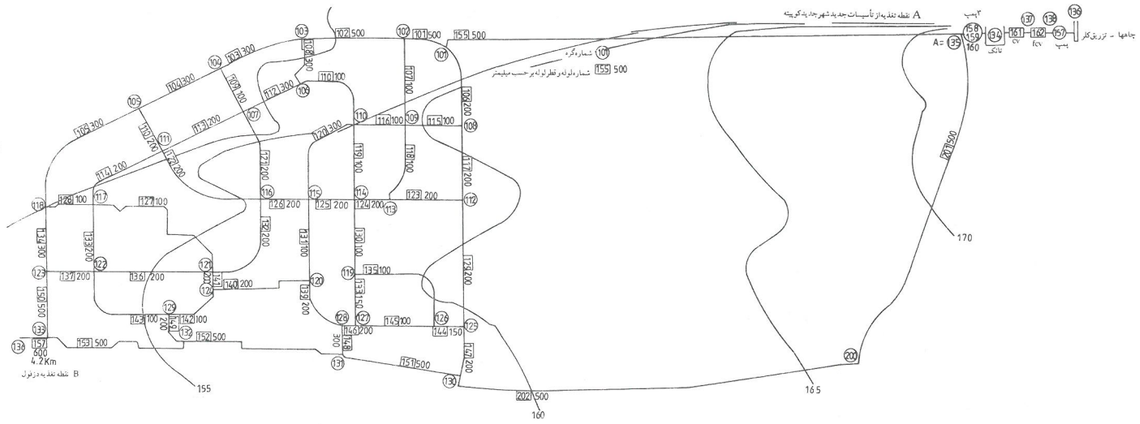
EPANET به زبان C نوشته شده و از حافظهٔ کامپیوتر به طور دینامیکی استفاده می‌کند. از این رو، حافظه قابل دسترس، تنها محدودیت برای بزرگی و اندازهٔ شبکه است.

در آخرین نگارش برنامه EPANET (۱۹۹۷) ارتباط سینماتیکی زوال کلر و تشکیل تری‌هالومتانها در شبکه‌های توزیع آب توصیف شده است. از طرف دیگر می‌توان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) داده‌های EPANET را تحلیل کرده و نقشه‌ها را مطابق شرایط روز اصلاح و بهنگام نمود.

کاربرد مدل EPANET برای شبیه‌سازی کلر باقیمانده درشبکه توزیع آب یک شهر

با توجه به سهولت دسترسی به مدل EPANET و توانایی بالای آن، از این مدل برای شبیه‌سازی مقدار کلر باقیمانده در شبکه توزیع آب یک شهر استفاده کرده‌ایم.

1- Worcester
2- Storage Tanks
3- Reservoirs



شکل ۱- شبکهٔ توزیع شهر جدید کوپیته

شماره گره‌ها شامل: نقاط اتصال لوله‌ها، چاهها و مخزن
شماره قطعات ارتباط دهنده شامل: لوله‌ها، پمپها و شیرها

توصیف شبکه

برای شبیه‌سازی کیفی، قسمتی از طرح شبکهٔ توزیع شهر جدید کوپیته که در شمال شرقی شهر دزفول قرار دارد، انتخاب شده است (شکل ۱). مساحت این منطقه ۳۰۳ هکتار، جمعیت آن حدود ۴۲۰۰۰ نفر و حداکثر کل نیاز آب در این منطقه ۳۰۲لیتر بر ثانیه برآورد شده است. قطر لوله‌های این شبکه از ۱۰۰ تا ۵۰۰میلی‌متر تغییر می‌کند. نقاط مختلف این شبکهٔ توزیع در حد فاصل ترازهای ۱۴۵ تا ۱۷۰متر از سطح دریا گسترده است. با توجه به خطوط تراز معلوم می‌شود که مناسب‌ترین جهت تغذیه شبکهٔ توزیع آب از شرق به غرب و از جنوب به شمال می‌باشد. اما به دلیل فوریت انتقال آب به این شبکه، این شبکه از لحاظ هیدرولیکی برای دو طرح بلند مدت و کوتاه مدت طراحی شده است. در هر دو طرح منبع تغذیه، آب چاهها می‌باشد [۲].

۱- طرح کوتاه مدت: در این حالت ۵۰ درصد آب مورد نیاز شبکهٔ توزیع بر خلاف شیب زمین به وسیله خط انتقالی به طول ۴/۲ کیلومتر از مخازن شهر دزفول از طریق گرهٔ B به شبکه تزریق می‌شود. در این طرح تعداد گره‌ها ۳۴، تعداد لوله‌ها ۵۴ و طول لوله گذاری ۲۴کیلومتر است.

۲- طرح بلندمدت: در طرح نهایی، آب از چاههای پیشنهاد شده در شمال شرقی کوپیته برداشت شده و در جهت شیب زمین از نقطه A به شبکه توزیع تزریق خواهد شد و چون به خاطر طرح کوتاه مدت، قطر بعضی از لوله‌ها بزرگ در نظر گرفته شده بود، در این حالت از طریق این شبکه می‌توان ۱۵۰لیتر بر ثانیه از آب چاههای پیشنهادی را به شهر دزفول انتقال داد. بنابراین نیاز آب ۴۵۲لیتر بر ثانیه خواهد شد. در این طرح تعداد گره‌ها ۳۹، تعداد لوله‌ها ۵۷ و طول لوله گذاری حدود ۲۵/۵ کیلومتر است.

شبیه‌سازی کلر باقیمانده

۱- فرضها

چون تمام اطلاعات شبکهٔ دزفول و شبکهٔ توزیع شهر کوپیته در دسترس نبود، قسمتی از شبکهٔ شهر جدید کوپیته شبیه‌سازی شده است (کوپیتهٔ ۲). بنابراین برای این که در هر دو طرح (طرح کوتاه مدت و طرح بلندمدت)، میزان کلر موجود در شبکه توزیع کوپیته ۲ تحت تأثیر مصرف آب شهر دزفول و یا تحت تأثیر مصرف آب در سایر قسمتهای شهر جدید کوپیته نباشد، فرضهایی برای ایزوله کردن این شبکه در نظر گرفته شده است که البته با واقعیت مطابقت ندارد.

به عنوان مثال در طرح کوتاه مدت، برای این که میزان کلر در این شبکه تحت تأثیر مصرف آب شهر دزفول قرار نگیرد، هنگام شبیه‌سازی، گرهٔ ۱۳۶ (نزدیک گرهٔ B) به عنوان یک منبع تغذیه‌کننده مجزا شده از آب شهر دزفول فرض شده است. همچنین در طرح بلندمدت، برای این که میزان کلر تحت تأثیر مصرف آب در سایر مناطق شهر جدید کوپیته نباشد، طرحی برای ایستگاه پمپاژ و مخزن این قسمت از شبکه توزیع فرض شده است. بدین ترتیب که، آب چاهها پس از کلرزنی به یک مخزن ۵۰۰۰مترمکعبی پمپ می‌شود. سپس آب درون مخزن پس از پمپاژ به وسیله دو خط لوله به قطر ۵۰۰میلی‌متر به ابتدای شبکه توزیع می‌رسد (گره‌های ۱۰۱ و ۱۳۰). ارتفاع این مخزن حدود ۵/۵ متر است که حداقل و حداکثر تراز آب در آن به ترتیب ۰/۴متر و ۵متر در نظر گرفته شده است. پمپ انتقال دهندهٔ آب چاه به مخزن، آب را تا ارتفاع ۵متری بالای کف مخزن می‌رساند. این پمپ ۱۸ساعت در شبانه‌روز کار می‌کند، بدین ترتیب که در ساعات ۳-۰ و ۲۴-۲۱ خاموش و در ساعت‌های ۲۱-۳روشن می‌باشد. همچنین برای این که پمپ در نقطهٔ طراحی کارکند و تحت تأثیر تغییرات تراز آب در مخزن قرار نگیرد، یک شیر کنترل کنندهٔ جریان[1] و برای این که در ساعات خاموشی پمپ، جریان معکوس رخ ندهد، یک شیر یک طرفه[2] پس از این پمپ قرار داده شده است. با توجه به این که سطح مخزن زمینی، اختلاف ارتفاع کمی (تراز کف مخزن زمینی ۷۱متر و تراز بالاترین نقطهٔ شبکه در گرهٔ ۱۰۸ برابر ۶۲متر و در نتیجه، h_m=۹-۶۲=۷۱) با بعضی از نقاط شبکه دارد، برای جبران افت ارتفاعهای موجود در شبکه توزیع و تأمین فشار مناسب سه پمپ با ارتفاع طراحی ۳۲متر و دبی ۱۵۱لیتر بر ثانیه بر اساس مصرف آب در شبکهٔ توزیع به مدار وارد می‌شود و آب را از مخزن به شبکه توزیع انتقال می‌دهد.

۲ - تزریق پیوسته ۰/۵میلی‌گرم در لیتر کلر در طرحهای کوتاه مدت و بلندمدت

در هر دو طرح، در گره ۱۳۶ (نزدیک گره‌های A و B) ۰/۵میلی‌گرم در لیتر کلر به طور پیوسته تزریق می‌شود و غلظت اولیهٔ کلر در سایر گره‌ها صفر فرض می‌شود، به استثنای این که در طرح بلندمدت، غلظت اولیه کلر در گره ۱۳۴ (مخزن) ۰/۵میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شده است.

شکل ۲ ترازهای کلر و شکل ۳ سرعت جریان شبیه‌سازی شده در شبکهٔ توزیع کوپیته ۲ را در ساعت ۱۴ (حداکثر مصرف ساعتی) برای دو طرح کوتاه مدت و بلندمدت نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود با تزریق پیوسته ۰/۵میلی‌گرم در لیتر کلر برای هر دو طرح ، در طرح بلندمدت ترازهای کلر باقیمانده بیشتری در شبکه توزیع وجود دارد و مقادیر نامطلوب کلر (کمتر از ۰/۲میلی‌گرم در لیتر)که در طرح کوتاه مدت وجود دارد، در این طرح مشاهده نمی‌شود.

علت این پدیده، وجود سرعتهای کم و زمان اقامت طولانی آب در لوله‌ها در طرح کوتاه مدت می‌باشد. از این رو نتیجه می‌گیریم که شبکهٔ توزیعی که از لحاظ هیدرولیکی خوب طرح نشده، می‌تواند در وضعیت کیفی آب داخل آن تأثیر نامطلوبی داشته باشد. بنابراین هنگام طراحی هیدرولیکی شبکه توزیع می‌توان با استفاده از نتایج شبیه‌سازی کیفی بهترین طرح را از نظر هیدرولیکی انتخاب کرد.

در ادامه، فقط ترازهای کلر در طرح درازمدت برای حالات مختلف بررسی خواهد شد.

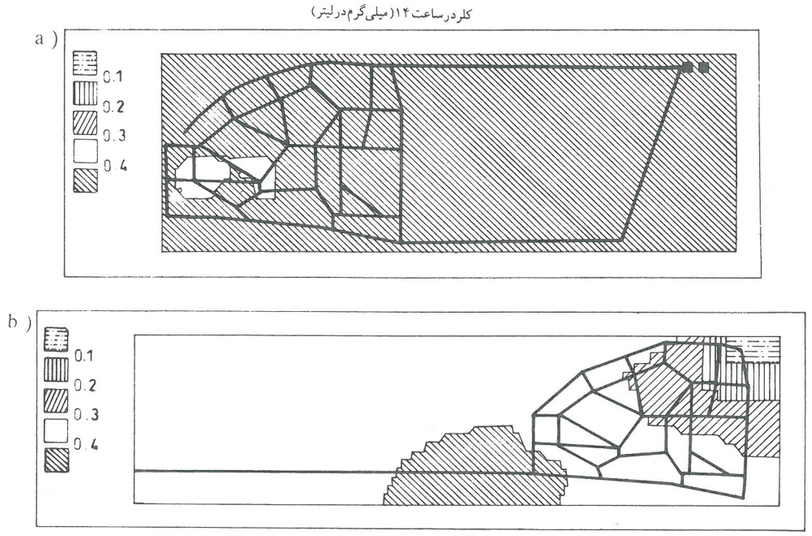
۳ - چگونگی تغییرات زمانی کلر باقیمانده در نقاط مختلف شبکهٔ توزیع کوپیتهٔ ۲ در طرح درازمدت

قبل از بررسی چگونگی تغییرات کلر باقیمانده در نقاط مختلف شبکه توزیع کوپیتهٔ ۲، به شکل ۴ توجه فرمایید. در این مجموعه، a) میزان کلر تزریقی به آب چاه که به طور پیوسته ۰/۵میلی‌گرم در لیتر می‌باشد، b) میزان جریان آب تازه کلرزده که به طرف مخزن پمپ می‌شود و c) تغییرات مصرف ساعتی را که برای همه گره‌ها یکسان است، نشان می‌دهند.

بخشهای d، e، f و g شکل ۴ به ترتیب تغییرات کلر را در مخزن (گرهٔ ۱۳۴)، سه گرهٔ نزدیک مخزن (گرهٔ ۱۰۱)، با فاصله متوسط از مخزن (گرهٔ ۱۱۶) و دور از مخزن (گرهٔ ۱۲۳) نشان می‌دهند.

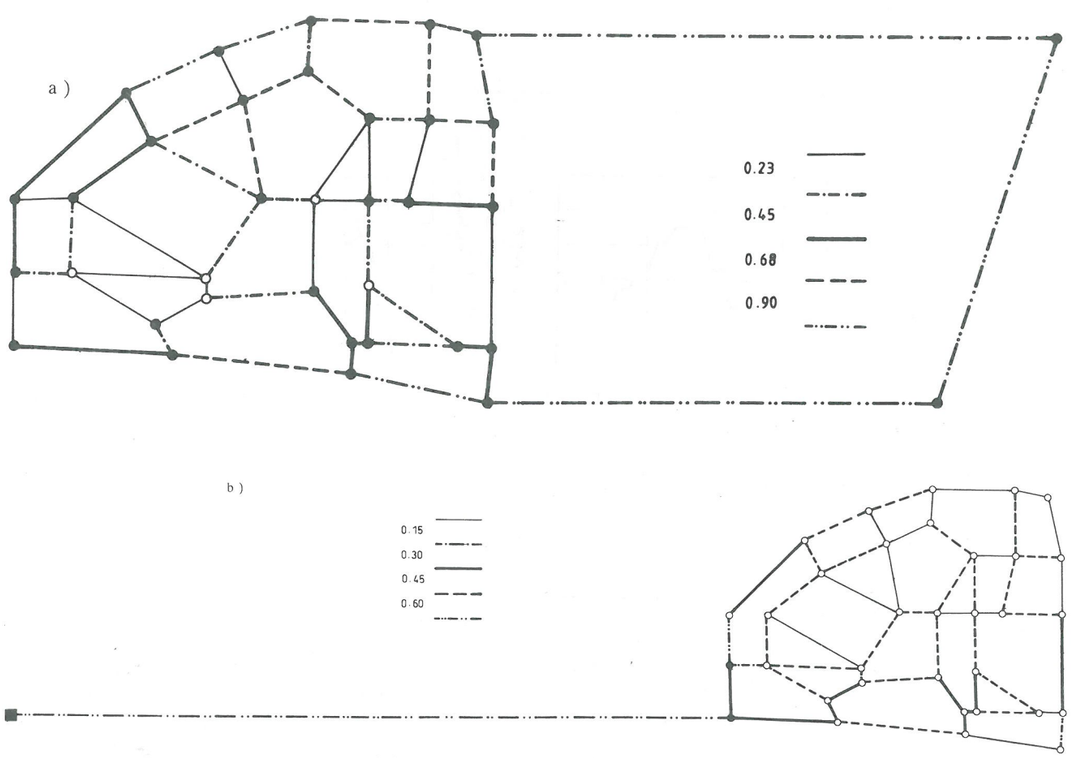
همان طور که مشاهده می‌شود تغییرات کلر در مخزن،

1- Flow control valve 2- Check valve



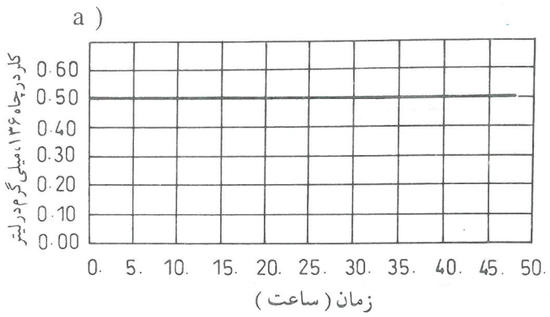
شکل ۲- ترازهای کلر باقیماندهٔ شبکهٔ توزیع کوپیتهٔ ۲ هنگام تزریق پیوسته ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر کلر

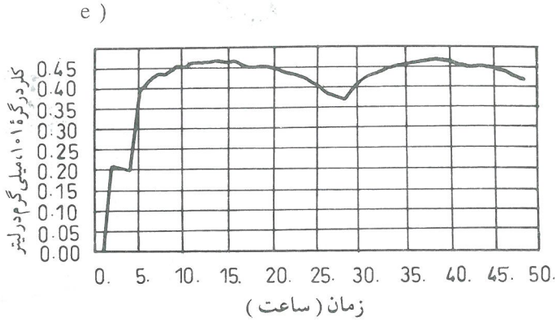
a)طرح بلندمدت b)طرح کوتاه‌مدت

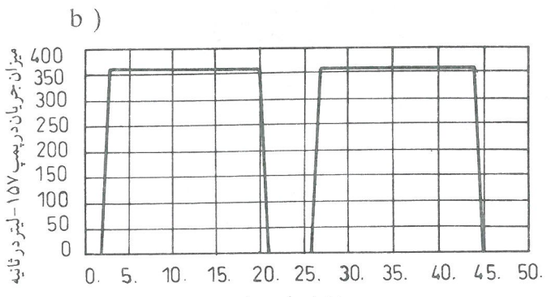


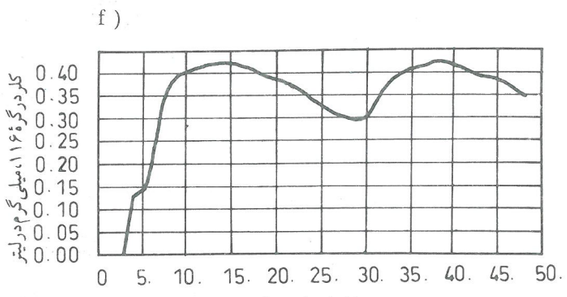
شکل ۳- سرعت جریان در لوله‌ها

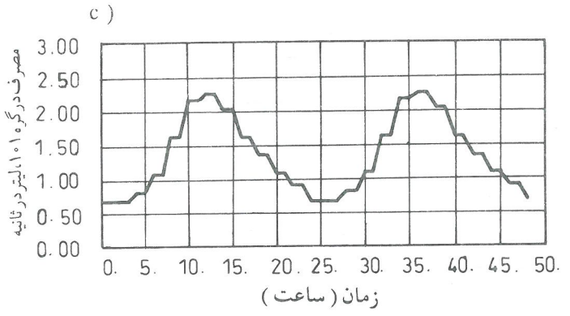
a)طرح بلندمدت b)طرح کوتاه‌مدت

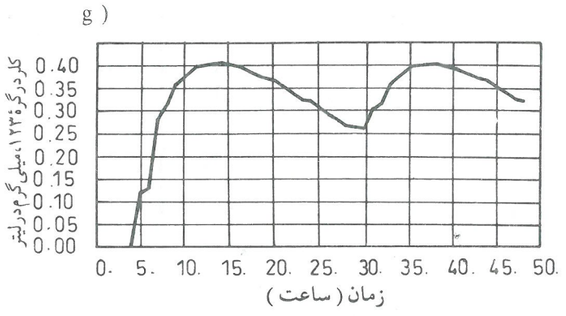


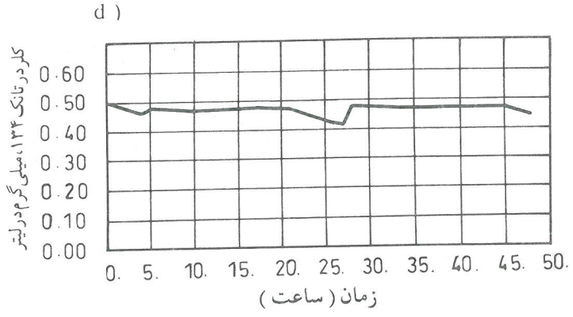












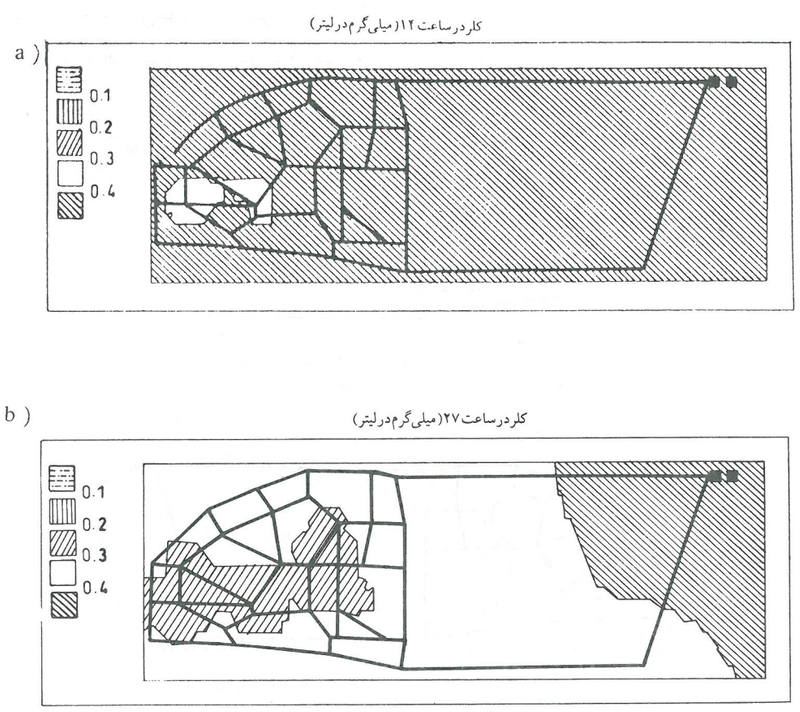
شکل ۲- چگونگی تغییرات کلر باقیمانده در نقاط مختلف شبکه توزیع کوپیتهٔ ۲ در طرح بلند مدت با تزریق پیوسته ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر کلر

تابعی از تغییرات مصرف ساعتی و پمپاژ آب کلرزده شده به مخزن می‌باشد. همچنین ترازکلر درگره نزدیک مخزن، شدیداً تحت تأثیر تغییرات کلر در مخزن و به دنبال آن تحت تأثیر تغییرات مصرف ساعتی می‌باشد (به ناهمواریهای متعدد در منحنی e توجه فرمایید). لکن درگرهٔ دور از مخزن، زمان ماند تا رسیدن به آن نقطه در ترازکلر باقیمانده نقش مؤثرتری دارد (تا ساعت ۴ شبیه‌سازی غلظت کلر در این گره صفر می‌باشد و هنوز آب کلردار به این گره نرسیده است). به همین دلیل ملاحظه می‌شود که بعد از رسیدن سیستم به یک وضع پایدار، کلر درگره نزدیک مخزن از ۰/۳۷ تا ۰/۴۷ میلی‌گرم در لیتر (شکل e) و در گره دور از مخزن از ۰/۲۶ تا ۰/۴۱ میلی‌گرم در لیتر (شکل g) تغییر می‌کند، که نشان دهنده میزان افت بیشتر درگره دور از مخزن است.

از طرف دیگر ملاحظه می‌شود که تغییرات کلر باقیمانده درگره‌ها تابعی از پمپاژ آب تازه کلر زده شده است. به عبارت دیگر هرگاه پمپ روشن است و آب جدید با غلظت کلر زیاد کلر به مخزن می‌فرستد، کلر باقیمانده درگره‌ها افزایش می‌یابد و هرگاه پمپ خاموش است و سیستم به وسیله آب کهنه مخزن تغذیه می‌شود، کلر باقیمانده کمتری مشاهده می‌شود.

۴- ترازهای کلر باقیمانده در ساعات ۱۴ و ۲۷ شبیه‌سازی در شبکهٔ توزیع کوپیتهٔ ۲ هنگام تزریق پیوستهٔ ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر کلر:

شکل ۵ توزیع زمانی و مکانی کلر باقیمانده را در ساعات ۱۴ (حداکثر مصرف ساعتی) و ۲۷ (حداقل مصرف ساعتی و پس از ۶ ساعت خاموشی پمپ) نشان می‌دهد. در این دو ساعت حداکثر و حداقل ترازهای کلر در شبکه وجود دارد. زیرا همان طور که از شکل ۵ نیز پیداست، در ساعت ۱۴ پمپ آب تازه کلر زده شده به مخزن می‌فرستد. همچنین به خاطر مصرف



شکل ۵- نتایج شبیه‌سازی کلر باقیمانده در طرح بلند مدت

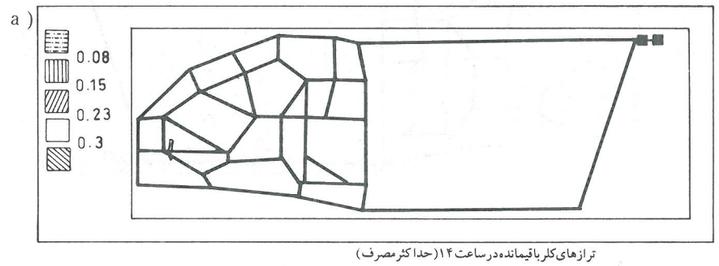
a) ترازهای کلر باقیمانده در ساعت ۱۴ شبیه‌سازی (حداکثر مصرف) b) ترازهای کلر باقیمانده در ساعت ۲۷ شبیه‌سازی (حداقل مصرف)

بیشتر، سرعت جریان در لوله‌ها زیاد و زمان اقامت کم است. از این رو میزان افت کلر کم بوده و مقدار حداکثر کلر در نقاط مختلف شبکهٔ توزیع وجود دارد. در ساعت ۲۷ (حداقل مصرف ساعتی) عکس این مطلب صادق است؛ یعنی پمپ به مدت ۶ ساعت خاموش بوده و شبکه از آب کهنهٔ مخزن تغذیه می‌کند. همچنین به خاطر مصرف کمتر، سرعت جریان در لوله‌ها کم و زمان ماند زیاد می‌باشد، از این رو میزان افت زیاد می‌باشد و مقدار حداقل کلر در نقاط مختلف شبکه توزیع وجود دارد.

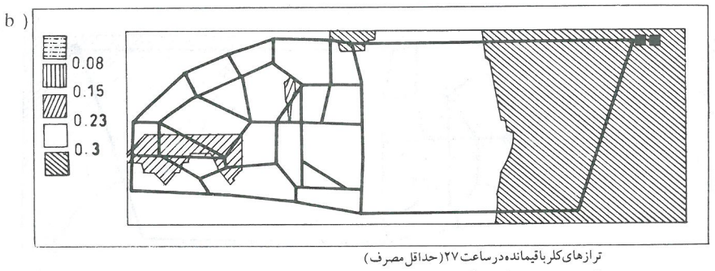
۵- بهینه‌سازی مقدار تزریق کلر (در حالت نوبودن لوله‌ها)

برای بهینه کردن مقدار کلر تزریقی، از روش سعی و خطا استفاده شده است. بدین ترتیب که برای حالتهای تزریق پیوستهٔ کلر با غلظتهای ۰/۵، ۰/۴ و ۰/۳میلی‌گرم در لیتر، توزیع مکانی کلر باقیمانده در زمانهای بحرانی (در این شبکه ساعات ۱۴ و ۲۷) بررسی شده است. ملاحظه می‌شود که با تزریق پیوستهٔ ۰/۳میلی‌گرم در لیتر کلر، حداقل کلر باقیمانده در شبکهٔ توزیع ۰/۲۲میلی‌گرم در لیتر می‌باشد و با تزریق پیوستهٔ ۰/۴میلی‌گرم در لیتر کلر، حداقل غلظت کلر باقیمانده در شبکهٔ توزیع در ساعت ۲۷ و برابر ۰/۱۹میلی‌گرم در لیتر می‌باشد.

با فرض این که غلظت مجاز کلر باقیمانده در شبکه، ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته شود، بررسی نتایج شبیه‌سازیهای مذکور، تزریق متغیر کلر به عنوان تزریق بهینه برای این شبکه پیشنهاد شده است. بدین ترتیب که در ساعات کم مصرف که سرعتها در شبکه کم و افت کلر زیاد است، کلر بیشتری به شبکه تزریق می‌شود و در ساعات پرمصرف که سرعتها در شبکه زیاد و افت کلر کم است، کلر کمتری به شبکه توزیع شود. بنابراین برای شبکه تزریق ۰/۳میلی‌گرم در لیتر در ساعات ۱۴-۰ و ۰/۴میلی‌گرم در لیتر در ساعات ۲۲-۱۴ پیشنهاد می‌شود. شکل ۶ توزیع مکانی کلر را در ساعات ۱۴ و ۲۷ با این برنامهٔ تزریق کلر به شبکهٔ توزیع کوپیته نشان می‌دهد. بدیهی است که چون کمتر از ۰/۵میلی‌گرم در لیتر تزریق داشتیم، مقدار حداکثر مجاز در این شبکه که ۰/۵میلی‌گرم در لیتر بود، کنترل نشد.



ترازهای کلر باقیمانده در ساعت ۱۴ (حداکثر مصرف)
کلر تزریقی بهینه (۰/۳ میلی‌گرم در لیتر در ساعتهای ۱۴-۰ و ۰/۴ میلی‌گرم در لیتر در ساعتهای ۲۴-۱۴)



ترازهای کلر باقیمانده در ساعت ۲۷ (حداقل مصرف)
کلر تزریقی بهینه (۰/۳ میلی‌گرم در لیتر در ساعتهای ۱۴-۰ و ۰/۴ میلی‌گرم در لیتر در ساعتهای ۲۴-۱۴)

شکل ۶- بهینه‌سازی تزریق کلر

a) ترازهای کلر باقیمانده در ساعت ۱۴ شبیه‌سازی　　b) ترازهای کلر باقیمانده در ساعت ۲۷ شبیه‌سازی

۶ - شبیه‌سازی راه‌حلهای ممکن برای تزریق مناسب کلر (حالت کهنه شدن لوله‌ها)

به مرور زمان، دیواره لوله‌ها فاسد می‌شود و میزان مصرف کلر افزایش می‌یابد. بنابراین اگر همان مقادیر کلر که هنگام نو بودن لوله‌ها پیشنهاد شد، به شبکه تزریق شود، مقادیر کلر در شبکه کمتر از حداقل مجاز خواهد شد. EPANET می‌تواند این وضعیت را تنها با تغییر ضریب زوال دیوار (K_w) شبیه‌سازی نماید. معادلات مورد استفاده در مدل شبیه‌سازی EPANET در مرجع ۶ بحث شده است.

یک راه حل برای رفع این مشکل افزایش کلر تزریقی و تعیین مقادیر بهینهٔ جدید است، که به روش شرح داده شده در حالت نو بودن لوله‌ها توسط EPANET به دست می‌آید (شکل ۷). مطابق این راه حل گاهی نیاز می‌شود برای حفظ حداقل مجاز در بعضی نقاط مردهٔ شبکه، مقادیر کلر بیشتری به شبکه تزریق شود که این امر باعث می‌شود در بعضی نقاط، مقدار کلر بیشتر از حد مجاز شود. از این رو این راه حل خوبی نیست، چراکه علاوه بر خطرات سرطانزایی برای انسان، شبکه را دچار فرسودگی زودرس می‌نماید. علاوه بر این، پس از مدتی میکروارگانیسم‌ها بر اثر مصرف مداوم و یکنواخت کلر، به این غلظت تزریق کلر هم مصونیت پیدا می‌کنند و باید دوباره مقدار کلر تزریقی را افزایش داد. راه حل دیگری که EPANET می‌تواند برای رفع این مشکل شبیه‌سازی نماید، استفاده از کلریناتورهای تقویتی [1] است که در مناطق با سرعتهای جریان کم قرار داده می‌شود. توزیع مکانی کلر باقیمانده در ساعت ۲۷ (حداقل مصرف ساعتی) پس از کهنه شدن لوله‌ها و استفاده از دو کلریناتور تقویتی در گره‌های ۱۰۹ و ۱۱۱ مطابق شکل ۷ می‌باشد.

راه حل دیگر، تعمیر، تعویض و اندود مجدد لوله‌های فرسوده است. این راه حل نیز با تغییر ضریب زوال دیوار توسط EPANTET قابل شبیه‌سازی است.

البته راه حل‌های دیگری نظیر ریختن آب با سرعت زیاد در نقاط مرده و لوله‌های قدیمی شبکه برای از بین بردن لایهٔ بیوفیلم چسبیده به دیوار لوله و ایجاد شوک کلر (مقدار تزریق زیاد در زمان کوتاه) برای این که فرصت ایجاد مصونیت را از میکروارگانیسم‌ها سلب نماید، وجود دارد که از حوصله این بحث (شبیه‌سازی توسط EPANTET) خارج است.

۷ - کشف عامل آلایندهٔ شبکهٔ توزیع از بین چندین عامل مشکوک توسط EPANET

گاهی یک بیماری بین مصرف کنندگان آب آشامیدنی در منطقه خاصی از شبکهٔ توزیع مشاهده می‌شود و چندین عامل مشکوک نظیر آلودگی یک چاه تغذیه کنندهٔ شبکه، پس‌زدگی فاضلاب از شبکه جمع‌آوری و روان‌شدن آن در سطح شهر و ورود آن به شبکه از طریق شکستگی لوله‌ها و یا محل تعویض کنتورها و وجود ارتباطات نامعلوم بین صنایع آلاینده و شبکه توزیع وجود دارد. برای این که بتوان عامل اصلی را از بین این عوامل مشکوک پیدا کرد، می‌توان هرکدام از این عوامل را شبیه‌سازی کرد و تأثیر آن را در توزیع مکانی کلر باقیمانده ملاحظه نموده و از این طریق عامل اصلی را کشف و رفع کرد. در شکل ۸ تأثیر ورود فاضلاب به دو لوله شکسته ۱۰۳ و ۱۲۶ در میزان کلر باقیمانده این شبکه نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که هرکدام از این عوامل تا چه محدوده‌ای را می‌تواند تحت تأثیر خود قرار دهد.

۸- ارائه یک الگوی نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری کلر و مقایسه نتایج کلرسنجی مشاهده شده با نتایج پیش‌بینی شده توسط EPANET

بر اساس نتایج شبیه‌سازی و داده‌های موجود (داده‌های مشاهده شده در محل قبل از شبیه‌سازی)، برنامهٔ مکانی و زمانی را می‌توان طبق توصیه‌های زیر پیشنهاد کرد:

۱- لوله‌ها با سرعت جریان کم (زیرا EPANET کلر باقیمانده را در لوله‌ها با سرعت جریان کم به خوبی محاسبه نمی‌نماید) در ساعتهای حداقل مصرف.

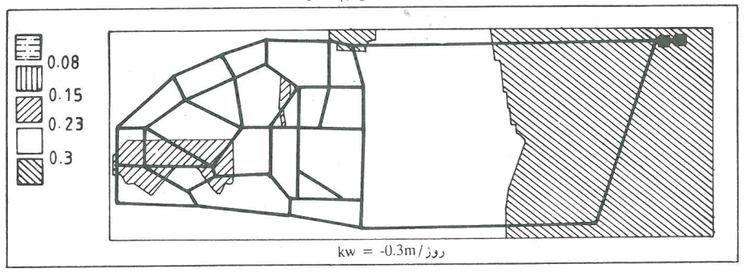
۲- گره‌های دارای کلر باقیمانده کم در ساعتهای حداقل مصرف.

۳- گره‌های دارای کلر باقیمانده زیاد در ساعتهای حداکثر مصرف.

1- Treatment Satellite

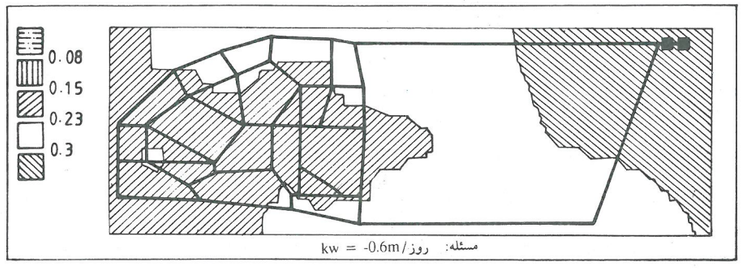
کلر در ساعت ۲۷ (میلی گرم در لیتر)

a)



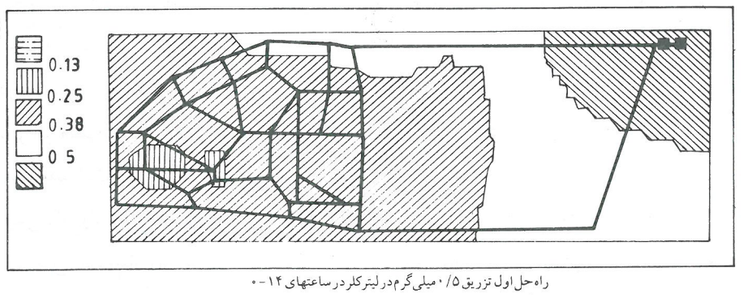
kw = -0.3m/روز

b)



مسئله: kw = -0.6m/روز

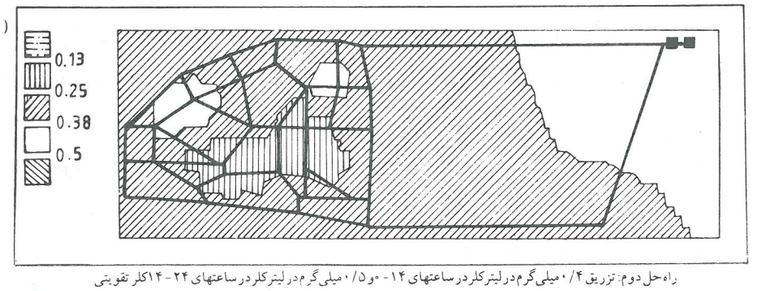
c)



راه‌حل اول: تزریق ۰/۵ میلی گرم در لیتر کلر در ساعتهای ۱۴ - ۰

تزریق ۰/۶ میلی گرم در لیتر کلر در ساعتهای ۲۴ - ۱۴

d)



راه‌حل دوم: تزریق ۰/۴ میلی گرم در لیتر کلر در ساعتهای ۱۴ - ۰ و ۰/۵ میلی گرم در لیتر کلر در ساعتهای ۲۴ - ۱۴ کلر تقویتی

در گره‌های ۱۰۹ و ۱۱۱: ۰/۵ میلی گرم در لیتر در ساعتهای ۱۴ - ۰ و ۰/۶ میلی گرم در لیتر کلر در ساعتهای ۲۴ - ۱۴ کلر تقویتی

شکل ۷- غلظت کلر باقیمانده در شبکه توزیع کوپیتهٔ ۲ در ساعت ۲۷ شبیه‌سازی

a) قبل از کهنه شدن لوله‌ها

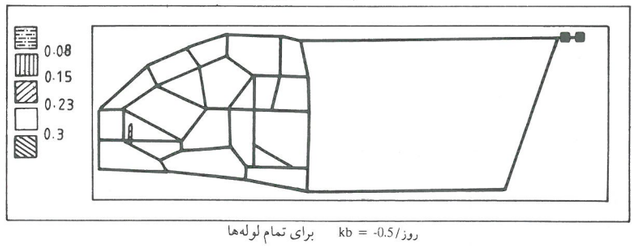
b) بعد از کهنه شدن لوله‌ها

c) پس از تزریق بهینهٔ کلر

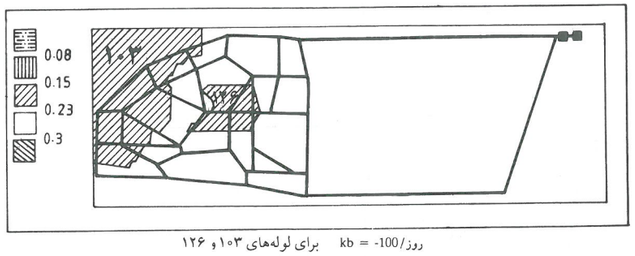
d) پس از استفاده از کلرناتورهای تقویتی

کلر در ساعت ۱۴ (میلی گرم در لیتر)

a)



kb = -0.5/روز برای تمام لوله‌ها



kb = -100/روز برای لوله‌های ۱۰۳ و ۱۲۶

kb = -0.5/روز برای دیگر لوله‌ها

شکل ۸- تأثیر شکستگی لوله و ورود فاضلاب به شبکهٔ توزیع بر غلظت کلر باقیمانده موجود در لوله‌ها

a) غلظت کلر باقیمانده در شبکهٔ توزیع قبل و بعد از شکستگی دو لوله ۱۰۳ و ۱۲۶

۴- در محل خروج از مخزن ذخیره در تمام ساعات.

بدین ترتیب می‌توان محلهای نمونه گیری را در نقشه‌ها علامت‌گذاری کرد. همچنین بعد از انجام نمونه گیری و سنجش کلر باقیمانده می‌توان با استفاده از EPANET گرافهایی برای مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط EPANET و نتایج مشاهده شده در محل، رسم کرد.

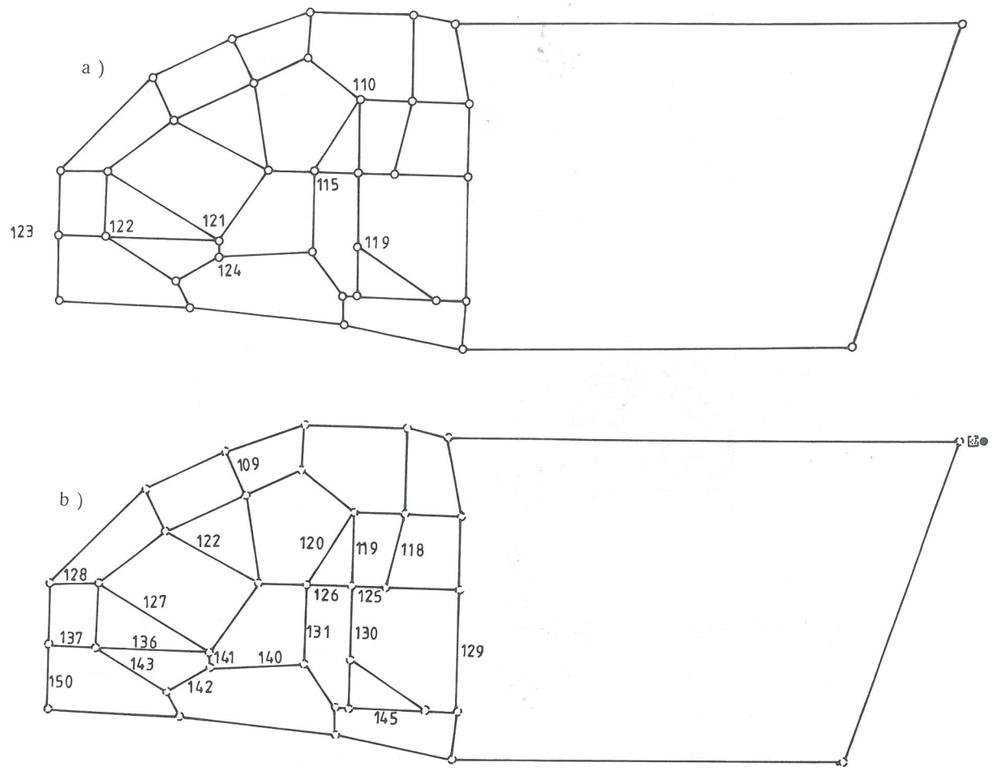
متأسفانه در این تحقیق، با توجه به این که شبکه توزیع شهر جدید کوپیته هنوز اجرا نشده است، امکان نمونه‌برداری و مقایسه نتایج مشاهده شده با نتایج پیش‌بینی شده توسط EPANET میسر نگردید. نقاط و لوله‌های پیشنهادی برای نمونه‌برداری در ساعات حداقل مصرف و برای شبکهٔ توزیع کوپیتهٔ ۲ در شکل ۹ نشان داده شده‌اند.

نتیجه گیری

۱- مدلهای دینامیکی کیفی آب می‌توانند تغییرات زمانی و مکانی غلظت کلر باقیمانده را تحت تغییرات گسترده شرایط هیدرولیکی در شبکه‌های توزیع پیش‌بینی نمایند. بهینه‌سازی تزریق کلر در شبکه با استفاده از این مدلها، ضمن این که می‌تواند از مصرف کلر توسط مواد آلی و تولید محصولات جانبی سرطانزا جلوگیری نماید، وجود حداقل غلظت مجاز کلر را در شبکه‌های توزیع تضمین می‌کند و بدین ترتیب از وقوع اپیدمی‌های ناشی از آب آشامیدنی جلوگیری می‌کند.

۲- مدل کامپیوتری EPANET به خوبی می‌تواند در حل هیدرولیکی شبکه، پیش‌بینی میزان کلر باقیمانده در شبکه، کشف علت شیوع بیماری ناشی از آلودگی آب آشامیدنی بهینه کردن فرایند کلرزنی، طراحی برنامه‌های نمونه گیری کیفیت آب، پروژه‌های بهسازی مخزن ذخیره، قرار دادن وسایل کلریناسیون مجدد، طراحی شبکه‌های جدید یا تعمیر و نوسازی شبکه‌های موجود، آنالیز خواص آب مخلوط شده با آبهای دیگر، مدیریت شبکه‌های چند منبعی با کیفیت‌های مختلف و استراتژیهای مدیریتی گوناگون برای نگهداری و بهبود کیفیت آب در شبکه‌های توزیع به‌کار رود. همچنین نگارش جدید این برنامه می‌تواند رشد محصولات جانبی را پیش‌بینی نماید.

۳- مهمتر از همه این که طراحی اصولی و صحیح



شکل ۹- اجزاء پیشنهادی شبکه برای نمونه‌برداری جهت اندازه گیری کلر باقیمانده

a)گره‌های پیشنهادی　　b)لوله‌های پیشنهادی

شبکه‌های آبرسانی و تعیین مکان مناسب منابع آب و سناریوهای مختلف نظیر پمپاژ مستقیم و یا استفاده از تانک ذخیره، تا حد وسیعی می‌تواند بر روی کیفیت آب موجود در شبکه توزیع تأثیر داشته باشد (به خاطر سرعت‌ها، زمان ماند، شعاع هیدرولیکی لوله، قطر لوله و ...).

منابع و مراجع

۱- موحدیان،ح. ۱۳۷۰.اندازه گیری والگوسازی تغییرات کیفی آب در شبکه‌های توزیع وکاربرد عملی به‌دست آمده، مجله آب و فاضلاب، کمیته تحقیقات آب و فاضلاب اصفهان، شماره ۷، صفحات ۳۴-۲۵.

۲- گزارش مطالعات طرح آبرسانی شهر جدید کوپته - شرکت مهندسی مشاور رامات، اسفند ۱۳۷۵.

۳- بررسی وضعیت کلرزنی آب مشروب در کشور، وزارت نیرو، امور آب، دفتر فنی، استاندارد صنعت آب، نشریه ۲۳، خرداد ماه ۱۳۶۶.

۴- مذاکرات حضوری با مسئولین وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی.

۵- مذاکرات حضوری با مسئولین شرکت آب و فاضلاب استان تهران.

۶- صفی صمغ آبادی،ا.، تجریشی م.وا.ابریشم چی، ۱۳۷۶، شبیه سازی کلر باقیمانده در شبکه‌های توزیع آب، مجموعه مقالات کنفرانس مدیریت آب و فاضلاب در کشورهای آسیایی، ۱۳-۱۱ اسفند، تهران.

7- Meader, J.L. (1986). " *Review and Analysis of a Computer Model Designed to Simulate the Chlorination and Disinfection Processes in a water Distribution System* ", MSc. thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA.

8- Rossman, L.A. (1994). " *EPANET User's Manual* ", Risk Reduction Engrg. Lab., U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.

9- Itoh, H., and Kurotani, K. (1990). " *Dynamic Analysis Concerning Water Quality in Distribution Networks and Advanced Control for Chlorine Injection* ", Proceeding of the 5th IAWPRC Workshop held in Yokohoma and Kyoto, Japan.

10- Levergood, G. E., Lewis, S.F. and Hart, F.R. (1988). " *Input Processor Package for Water System Studies: An Input Processor Package for Water Distribution Simulation Model, Named Clnet* ", Proc. 3rd Water Resour. Oper. Mangt. Workshop, ASCE, New York, USA, PP. 850 - 863.

11- Clark, R.M., and Grayman, W.M. (1990). " *Measuring and Modeling Variations in Distribution Systems Water Quality* ", J. AWWA, August, PP. 46-53.

12- Clark, R.M., and Grayman, W.M. (1991). " *Field Testing Distribution Water Quality Models* ", J. AWWA, July, PP. 67-75.

13- Liou, C.P. and Kroon, J.R. (1987). " *Modeling the Propagation of Waterborne Substances in Distribution Networks.* " J. AWWA, 79 (11): 54-58.

14- Rossman, L. A, and Boulose, P. F. (1996). " *Numerical Methods for Modeling Water Quality In Distribution Systems: A Comparison* ", J. Water Resources Planning and Management, 22 (2): 137-146.

15- Boulose P. F., Altman, T., Jarrige P.A., and Collevati, F. (1995). " *Discrete Simulation Approach for Network - Water - Quality Models.* ", J. Water Resources Planning and Management, 121 (1): 49-60.

16- Clark, R. M., Grayman, W. M., Males, R. M., and Hess, A. F. (1993). " *Modeling Contaminant Propagation in Drinking - Water Distribution Systems* ", J. Environmental Engineering, 119 (2): 349-364.

17- Clark, R. M., Grayman, W. M., Goodrich, J. A., Deininger R. A., and Skov, K. (1994). " *Measuring and Modeling Chlorine Propagation in Water Distribution Systems.* ", J. Water Resources Planning and Management, 120 (6): 871-887.

18- Grayman, W. M., Clark, R. M., and Males, R. M., (1988). " *Modeling Distribution- System Water Quality: Dynamic Approach* ", J. Water Resources Planning and Management, 114 (3): 295-312.

19- Males, R. M., Grayman, W. M., and Clark, R. M., (1988). " *Modeling Water Quality in Distribution Systems* ", J. Water Resources Planning and Management, 114 (2): 197-208.

20- Rodriguez, M.J., Serodes, J.B., and Côte, P.A. (1997). " *Advanced Chlorination Control in Drinking Water Systems Using Artificial Neural Networks* ", J. Water Supply, 15 (2): 159-168.