

Research Paper

Analysis and Quality Management of Water Distribution Networks Under pollution intrusion in the Situation of Water Pressure Reduction (Case Study: Zahedan water Distribution Network)

Siroos Harif¹, Gholamreza Azizyan^{2*}, Mohammad Givehchi³ Mohsen Dehghani Darmian⁴

1 PhD of water engineering and hydraulic structures, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

2 Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

3 Assistant Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

4 Department of Hydraulic Engineering and Hydro-Environment, Water Research Institute, Tehran, Iran.



10.22125/IWE.2020.216105.1280

Received:
March 15, 2021
Accepted:
June 14, 2021
Available online:
October 3, 2023

Keywords:
Click or tap here to enter text. Detention Time, Dilution flow, Network Quality Management, Water Network Pollution

Abstract

Pollution entrance into water distribution networks can cause irreparable damage to human health. Awareness and understanding of pollutant sources and transport of contamination process in the water network cause suitable modeling of this phenomenon as well as perform a proper crisis management. To simulate the movement of nitrate in the soil, the nitrate advection-dispersion equation was programmed in MATLAB. Potential points with high concentration of pollutants in Zahedan water distribution network have been identified. Scenario of 24-hour water network simulation, after two hours of contamination, was tested for water contamination by using WATERGEMS, EPANET and EPANET-BAM software. To manage the network pollution crisis, two tools were proposed including detention time and dilution flow. To calculate detention time, the network was divided into four parts including: near, middle, far and very far. The results indicated that required detention time in the nodes of the middle, far and very far decreased 33 to 50, 58 to 62.5 and 75 percent compared to the near nodes, respectively. Moreover, efficiency and positive performance of dilution flow as a tool for quality management and control of water distribution network, was proved. Required dilution flow was determined from 10.6 to 15.9% of the base pipe flow.

1. Introduction

Due to their large size and complex configurations, water distribution systems (WDSs) are highly vulnerable to accidental and intentional contamination events. When an event occurs in a water distribution system, such as large-scale water pollution, it can have a significant impact on society and the economy. For example, in 2014 in West Virginia (USA), 300,000 consumers were affected when

* **Corresponding Author:** Gholamreza Azizyan

Address: Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Email: g.azizyan@eng.usb.ac.ir

Tel: Click or tap here to enter text.

the drinking water distribution system was accidentally contaminated with the methylcyclohexane methanol. In this research, firstly, the advection-dispersion of nitrate pollutant in the soil has been simulated by MATLAB software. Then, potential points with high concentration of pollutants in Zahedan network have been investigated. After that, an important part of the drinking water network of Zahedan under the sudden inflow of nitrate has been investigated using three numerical models: EPANET, Water GEMS and EPANET-BAM. Finally, to manage the network pollution crisis, two tools were proposed including detention time and dilution flow.

2. Materials and Methods

In this research for simulating the effect of a contamination event distributed through the water network, the EPANET, Water GEMS and EPANET-BAM software were used. The 24-hour simulation scenario of the water network of Zahedan city after the pollution occurred between 15:00 and 17:00 was investigated. To calculate detention time, the network was divided into four parts including: near, middle, far and very far.

3. Results

By investigating the strategy of detention time to control unallowable pollution in different nodes of the network in all three numerical models, it was observed that in the nodes close to pollution injection (near area), the detention time for pollution is longer than the nodes that were in very far area. Therefore, it can be said that when unallowable pollution enters the network, the nodes near the injection node have more stress than the middle, far, and very far areas, and more detention time should be given to correct the water quality.

By comparing the duration of pollution with a concentration higher than the allowable concentration for the middle area compared to the near area, it was observed that this duration in the middle area is associated with a 33-50% decrease compared to the near area.

Also, by comparing the duration of the presence of pollution with a concentration higher than the allowable concentration for the far area compared to the middle area, it was observed that this duration in the far area is associated with a decrease of 25 to 37.5 percent compared to the middle area.

The comparison of the duration of pollution with a concentration higher than the allowable concentration for the very far area compared to the far area showed that this duration in the very far area is associated with a 33-40% decrease compared to the far area.

In the second stage of pollution management in the network, a dilution flow tool has been used. dilution flow is an efficient and cost-effective tool for the quality management of water resources systems. During this process, it was observed that a specific volume of water should be entered as a diluting flow at different points of pollution entering the network. This amount of flow is completely dependent on the base pipe flow. In other words, if the base pipe flow is high, more dilution flow is needed to improve the water quality of the network. Required dilution flow to treat the quality water was determined from 10.6 to 15.9% of the base pipe flow.

4. Discussion and Conclusion

In this research, Scenario of 24-hour water network simulation, after two hours of contamination, was tested for water contamination by using WATERGEMS, EPANET and EPANET-BAM software. Finally, to manage the network pollution crisis, two tools were proposed including detention time and dilution flow.

To calculate detention time, the network was divided into four parts including: near, middle, far and very far.

The results showed that the detention time required to improve the water quality for the nodes in the very far area is less than the nodes in the near area, and for the very far area compared to the near area, it was associated with a decrease of 75 percent.

Then, the positive and efficient effect of the dilution flow as a network management and quality control tool was also proven. Thus, by using a certain volume of water as a dilution flow after detecting the contamination by sensors located in different parts of the network, water quality was improved and the

nitrate concentration was allowable. It should be noted that required dilution flow to treat the quality water was determined from 10.6 to 15.9% of the base pipe flow.

5. Six important references

- 1) Darmian, M. D., S. A. H, Monfared., G, Azizyan., S. A, Snyder and J. P, Giesy. 2018. Assessment of tools for protection of quality of water: Uncontrollable discharges of pollutants. *Ecotoxicology and environmental safety*, 161, 190-197.
- 2) Farhadian, M., O.B, Haddad., S, Seifollahi-Aghmiuni and H.A, Loáiciga. 2014. Assimilative capacity and flow dilution for water quality protection in rivers. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 19(2), p.04014027.
- 3) Hammer, M.J. 2000. *Water and Wastewater Technologies*. 2nded. John Wiley and Sons, NewYork, 137-157.
- 4)
- 5) Harif, S., Azizyan, G., Dehghani Darmian, M. and Givehchi, M., 2023. Selecting the best location of water quality sensors in water distribution networks by considering the importance of nodes and contaminations using NSGA-III (case study: Zahedan water distribution network, Iran). *Environmental Science and Pollution Research*, 30(18), pp.53229-53252.
- 6) Moghaddam. 2017. Water quality planning in rivers: assimilative capacity and dilution flow. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 99(5), 531-541.
- 7) Soudani, A., M, Chiban., M, Zerbet and F, Sinan. 2011. Use of Mediterranean plant as potential adsorbent for municipal and industrial wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 3(8), 199-205.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



تحلیل و مدیریت کیفی شبکه‌های توزیع آب تحت نفوذ آلودگی در شرایط کاهش فشار آب (مطالعه موردی: بخشی از شبکه توزیع آب زاهدان)

سیروس حریف^۱، غلامرضا عزیزیان^{۲*}، محمد گیوه‌چی^۳، محسن دهقانی درمیان^۴

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

مقاله پژوهشی

چکیده

ورود آلودگی به شبکه‌های توزیع آب می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به سلامت انسان وارد کند. آگاهی و شناخت از منابع ورود آلاینده و نحوه حرکت آن باعث مدل‌سازی مناسب این پدیده و انجام مدیریت بحران مناسب می‌گردد. به‌منظور شبیه‌سازی حرکت نیترات در خاک، معادله انتقال-پخش آلودگی خاک در MATLAB کد نویسی گردید. سپس نقاط مستعد با غلظت بالای آلاینده در شبکه توزیع آب شهر زاهدان شناسایی گردیدند. سناریو شبیه‌سازی ۲۴ ساعته شبکه پس از وقوع دوساعته آلودگی، با استفاده از نرم‌افزارهای EPANET.WATERGEMS و EPANET- BAM مورد مدل‌سازی قرار گرفت. دو ابزار کارآمد و مقرون بصره زمان ماند و جریان رقیق‌ساز بمنظور مدیریت کیفی شبکه مورد استفاده واقع شدند. برای شبیه‌سازی ابزار زمان ماند، شبکه به چهار منطقه نزدیک، میانه، دور و خیلی دور تقسیم گردید. نتایج تحلیل کیفی شبکه بیانگر این بود که زمان ماند موردنیاز گره‌های ناحیه میانه، دور و خیلی دور نسبت به حالت نزدیک به ترتیب بین ۳۳ تا ۵۰، ۵۸ تا ۶۲/۵ و ۷۵ درصد کاهش می‌یابد. در ادامه تأثیر مثبت و کارآمد جریان رقیق‌ساز به‌عنوان یک راهکار مدیریت و کنترل کیفی شبکه توزیع به اثبات رسید. مقدار جریان رقیق‌ساز لازم به‌منظور بهبود وضعیت کیفی آب شبکه، بین ۱۰/۶ تا ۱۵/۹ درصد دبی پایه لوله محاسبه گردید.

واژه‌های کلیدی: آلودگی شبکه آب، جریان رقیق‌ساز، زمان ماند، مدیریت کیفی شبکه

-
- ۱- دکترای مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. siroos.harif@pgs.usb.ac.ir
 - ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، پست الکترونیکی: g.azizyan@eng.usb.ac.ir (نویسنده مسئول)
 - ۳- استادیار، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. m_givehchi@yahoo.com
 - ۴- پژوهشگر هیدرولیک و محیط‌های آبی، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. Mohsen.dehghanidarmian@gmail.com



مقدمه

نخستین تمدنی که بشر به شکل شهرنشینی آغاز نمود، در کنار رودخانه صورت پذیرفت؛ اما این آغاز راه بود و با گسترش شهرها و افزایش جمعیت و عدم امکان ساخت همه‌ی شهرها در کنار رودخانه‌ها، انسان‌ها به فکر تأمین هر چه راحت‌تر آب جهت ادامه حیات خود افتادند. به‌کارگیری و ایجاد شبکه‌های آبرسانی به شکل امروزی برای اولین بار در سال ۱۳۰۱ در ایران مورد بررسی قرار گرفته و در برخی شهرها مانند آبادان، مشهد و بیرجند اجرا شدند. یک شبکه آبرسانی باید قادر باشد نیازهای آبی مشتریان را از نظر کمی (دبی و فشار) و کیفی (خواص فیزیکی و شیمیایی آب) برابر استانداردهای موجود به‌خوبی فراهم نماید (منزوی، ۱۳۸۸). سیستم‌های توزیع آب به خاطر جغرافیای گسترده و نقاط در دسترس فراوان در مقابل آلودگی‌های تصادفی یا عمدی آسیب پذیراند (میری و همکاران، ۱۳۹۳). آلودگی آب عبارت است از وجود یک یا چند ترکیب شیمیایی یا عوامل بیماری‌زا در آب به حدی که استفاده از آن برای مصرف‌کننده مخاطره‌آمیز باشد یا منجر به بیماری شود. به‌طور کلی آلودگی منابع آب به دودسته آلودگی شیمیایی و آلودگی میکروبی تقسیم‌بندی می‌شود. یکی از املاحی که بالا بودن غلظت آن در آب آشامیدنی از نظر بهداشتی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد و باید مورد سنجش قرار گیرد. غلظت نیترات است که علاوه بر آلودگی میکروبی می‌تواند به‌عنوان یکی از پارامترهای کنترل کیفی آب نوشیدنی به حساب آید (McGhee et al., 1991, Hammer, 2000). مطابق با مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران حداکثر غلظت مجاز نیترات در آب آشامیدنی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر است (موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران). غلظت‌های زیاد نیترات در آب مصرفی می‌تواند منجر به متهموگلوبینمی در نوزادان و نیز تشکیل ترکیبات سرطان‌زای نیتروزآمین شود (Greer et al., 2005). دسترسی به منابع آب آشامیدنی سالم در دنیای امروز از عوامل اصلی توسعه کشورها بشمار می‌رود. طبق آمار

سازمان جهانی بهداشت، سالانه ۱/۱ میلیارد نفر در جهان به منابع آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند (WHO., 2006) و حدود ۸۰ درصد از مرگ‌ومیر کودکان در اثر بیماری‌های گوارشی مانند اسهال به دنبال مصرف آب آشامیدنی آلوده روی می‌دهد (Balbus et al., 2001). در همین راستا، طبق گزارشات اعلام‌شده در سال ۲۰۱۷ سالانه ۴۸۵۰۰۰ کودک در اثر بیماری مرتبط با آب آلوده (اسهال) جان خود را از دست می‌دهند (World Health Organization, 2017). شبکه‌های توزیع به دلیل‌های گوناگون، منجر به کاهش کیفیت آب در خطوط آبرسانی می‌شوند. راه‌یابی مواد آلی به خطوط آبرسانی به علت عواملی مانند شکستگی‌ها، سیفون معکوس، نشت‌های ریز، کاهش و یا فقدان ماده گندزدا، کنش و واکنش متقابل آب و لوله و وجود میکروارگانیسم‌ها و مواد آلی که از فرایندهای تصفیه عبور کرده‌اند و ... می‌باشد. این عوامل شرایط را برای رشد جمعیت میکروبی و تغییر ترکیب شیمیایی آب در شبکه‌های توزیع فراهم می‌آورند. به همین دلیل است که آلودگی آب در شبکه‌های توزیع با سهمی معادل ۲۹ درصد مهم‌ترین عامل شیوع بیماری‌های منتقله از راه آب دانسته شده است. در ایران نیز مهم‌ترین عامل ایجاد و شیوع بیماری‌های منتقله از راه آب، آلودگی آن در شبکه‌های توزیع است. به‌این ترتیب توجه به کیفیت آب در خطوط آبرسانی در زمره یکی از مهم‌ترین سرفصل‌های کاری واحدهای کنترل کیفیت قرار دارد (قنادی، ۱۳۸۲). هنگامی که یک رویداد در سیستم انتقال آب اتفاق می‌افتد، مانند آلودگی آب در مقیاس وسیع به‌صورت تصادف یا حمله مخرب، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر جامعه و اقتصاد داشته باشد. به‌طور مثال در سال ۱۹۹۳ در میلوآکی (ایالات متحده آمریکا) ورود آلودگی به شبکه انتقال آب اتفاق افتاد که ۴۰۳۰۰۰ مصرف‌کننده را تحت تأثیر قرارداد و هزاران نفر در بیمارستان بستری شدند و تعدادی هم مرگ‌ومیر داشت؛ که هزینه پزشکی و هزینه بالقوه ۹۶/۲ میلیون دلار را برآورد کرده‌اند (Corso et al., 2003). اخیراً،

هیچ‌یک از تحقیقات فوق اثر هم‌زمان شبیه‌سازی انتقال آلودگی در ستون خاک و ورود آن از طریق فشار منفی به شبکه توزیع آب بررسی نشده است. لذا در این تحقیق ابتدا نحوه انتقال- پخش آلاینده نیترات در محیط خاک توسط نرم‌افزار MATLAB تا مجاورت لوله‌های آب شبیه‌سازی گردیده است. سپس نقاط مستعد مکش و ورود آلودگی به شبکه توزیع آب شرب شهر زاهدان مورد تحقیق قرار گرفته و نقاط با ریسک بالا برای نفوذ آلودگی تعیین گردیده‌اند. پس‌از آن به بررسی بخش مهمی از شبکه آب شرب زاهدان تحت ورود ناگهانی نیترات با استفاده از سه مدل عددی EPANET، Water GEMS و EPANET-BAM پرداخته شده است. در نهایت بمنظور مدیریت کیفی صحیح شبکه از دو ابزار جریان رقیق‌ساز و زمان ماند استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

معرفی نرم‌افزارهای مورد استفاده

نرم‌افزار EPANET

یکی از نرم‌افزارهای مورد استفاده در این تحقیق به‌منظور مدل‌سازی هیدرولیکی و کیفی شبکه‌ی آبرسانی، مدل کامپیوتری آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا با نام EPANET می‌باشد. EPANET از جمله قدرتمندترین نرم‌افزارهای طراحی شبکه‌های آبرسانی می‌باشد که به‌صورت رایگان از سوی آژانس حفاظت محیط‌زیست (EPA) ارائه می‌گردد. این نرم‌افزار رفتار هیدرولیکی و کیفی آب را در شبکه‌های لوله‌کشی در دوره‌های زمانی تعیین شده، شبیه‌سازی می‌کند (Rossman, 2000).

نرم‌افزار EPANET-BAM

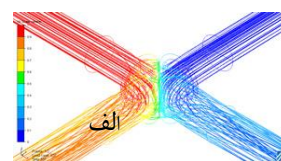
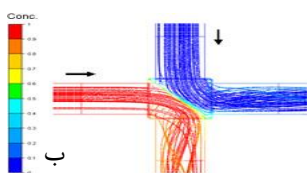
اخیراً مدلی جدید بر پایه نرم‌افزار EPANET منتشر شده است که مدل‌سازی کیفی EPANET را در برخی از شرایط زیر سؤال برده و نتایج آن را اشتباه می‌داند. انتقال آلودگی از طریق شبکه‌های توزیع به اختلاط در اتصالات لوله و جریان‌ها و غلظت آلودگی

در سال ۲۰۱۴ در غرب ویرجینیا (ایالات متحده آمریکا)، ۳۰۰،۰۰۰ مصرف‌کننده زمانی که سیستم توزیع آب آشامیدنی به‌طور تصادفی با ماده خام شیمیایی MCHM آلوده شده بود، تحت تأثیر قرار گرفتند (Cooper, 2014).

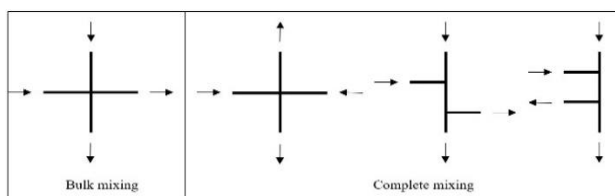
مطالعات متعددی در نقاط مختلف دنیا در زمینه طراحی و بررسی شبکه‌های توزیع آب به‌صورت عددی و آزمایشگاهی انجام گرفته است. به‌طور مثال (نصیری‌پور و همکاران، ۱۳۹۸) موقعیت بهینه برای نصب شیرهای فشارشکن در شبکه توزیع آب شهر بیرجند را مورد بررسی قرار دادند. (کیانی و همکاران، ۱۳۹۷) به معرفی و مدل‌سازی اثرات ویسکوالاستیک در جریان‌های گذرا در لوله‌های پلیمری رایج در شبکه‌های آبرسانی پرداختند. (سلگی و همکاران، ۱۳۹۸) غلظت و پهنه‌بندی برخی پارامترهای کیفی شبکه آب شرب شهر ملایر با استفاده از روش‌های آماری و GIS مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش غلظت نیترات برابر ۲۷/۶۱ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شد. (Besner et al., 2009) مطالعاتی را در خصوص منابع خارجی آلودگی دنبال کردند. آنان متوجه شدند که افزایش بیماری‌های دستگاه گوارش در جمعیت مصرف‌کننده آب خانگی ممکن است با کمبودهای سیستم توزیع ارتباط داشته باشد. (Tao et al., 2012) به شناسایی منابع آلودگی در شبکه توزیع آب بر اساس تشخیص الگو (Pattern Recognition) پرداختند. همچنین (LeChevallier et al., 2003) بر روی پتانسیل خطرات بهداشتی نفوذ آلاینده‌ها به سیستم‌های توزیع آب ناشی از تغییرات فشار مطالعه کردند. در این تحقیق خطرات بالقوه فشارهای گذرای کم یا منفی برای نفوذ آلودگی‌ها در شبکه‌های توزیع آب آشامیدنی مورد بررسی قرار گرفته است. (Harif et al., 2023) به تعیین جانمایی بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی در شبکه‌های توزیع پرداختند. (حریف و همکاران، ۱۴۰۲) جانمایی بهینه سنسورهای تشخیص آلودگی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت هریک از پارامترهای میزان تقاضای گره‌ها و ضریب زبری لوله‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. در



مقطع اتصال تمایل به دوشاخه شدن دارد که بسته به حرکت نسبی جریان سیال منجر به اختلاط ناقص می‌شود (sandia.gov). به منظور رفع این مشکل (Ho et al., 2007) با انجام مطالعات آزمایشگاهی و محاسباتی به بررسی عدم اختلاط کامل پرداختند. نتایج آن‌ها به مدل آزمایشگاهی بسیار نزدیک بود. این مدل جدید با استفاده از مجموعه‌ای جدید از پارامترها ایجاد شده است. همان‌طور که در شکل ۲، نشان داده شده است، این مدل تنها برای اختلاط اتصالات متقابل، با ورودی مجاور (و خروجی) قابل تحلیل است و برای سایر گره‌ها فرض بر اختلاط کامل است. این مدل جدید با نام EPANET-BAM (Bulk = Advective Mixing) معرفی شده که کدها و معادلات آن به مدل EPANET وارد گردیده است



شکل (۱): (الف): برابری جریان‌های دوشاخه‌ای در اتصالات متقاطع. (ب): نمایش ۳ بعدی بیانگر اختلاط ناقص (sandia.gov)



شکل (۲): اتصالاتی مورد بررسی مدل هوو و همکاران (sandia.gov)

معادلات آلودگی در خاک

معادله انتقال-پخش آلودگی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

که این معادله دیفرانسیل شامل ترم‌های انتقال و پخش می‌باشد. در این معادله c مقدار غلظت آلاینده در زمان t و مکان x برحسب میلی‌گرم بر لیتر است، u متوسط سرعت جریان برحسب متر بر ثانیه و D ضریب پخش است. این معادله روش‌های حل عددی و تحلیلی

نرم‌افزار Water GEMS

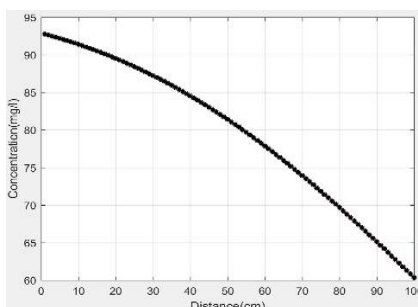
بعد از برنامه‌های EPANET, Loop, Water Cad پیشرفته‌ترین و قدرتمندترین نرم‌افزار طراحی شبکه‌های آبرسانی در قالب برنامه Water GEMS ارائه شده است. این برنامه در واقع همان نسخه ارتقا یافته نرم‌افزار Water Cad می‌باشد که توسط شرکت‌های Bently و Haestade طراحی شده است (Almandoz et al., 2005).

آلودگی منبع بوده است. لذا بخش جابجایی معادله به سرعت حرکت آلاینده در خاک مربوط بوده و بخش پراکندگی نیز مربوط به ضریب پخش است. در این پژوهش غلظت اولیه نیترا ت مطابق با تحقیقات سودانی و به میزان ۹۲/۹ میلی گرم بر لیتر تعیین شد (Soudani et al., 2011). با توجه به عمق لوله های آبرسانی مدفون شده در خاک میزان جابجایی حداکثر به ۱۰۰ سانتی متر می رسد، بنابراین غلظت ثانویه آلودگی نیز تا همین فاصله در خاک تعیین شده و معادله برای فاصله ۱۰۰ سانتی متر حل گردیده است. در نهایت غلظت عبوری از یک ستون خاک ماسه ای به میزان حدود ۳۵ درصد کاهش یافته است به طوری که غلظت آلودگی در فاصله ای به طول یک متر، ۶۰/۳۳ میلی گرم بر لیتر به دست آمده است. این عدد به عنوان غلظت آلودگی در کنار لوله بوده و همین میزان به عنوان غلظت اولیه برای آلاینده راه یافته به درون شبکه در نظر گرفته شده است

متفاوتی دارد که به علت دقت بالای حل تحلیلی در این پژوهش از حل تحلیلی استفاده شده است. حل های تحلیلی مختلفی تاکنون برای معادله انتقال ارائه شده است. با توجه به شرایط مسئله روش حل اوگاتا و بانکز (رابطه ۲) جهت انتقال آلودگی در بخش خاک انتخاب گردید.

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \operatorname{erf} \left(\frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2)$$

که در آن C_0 غلظت اولیه آلاینده (ML^{-3})، v سرعت حرکت آلاینده در خاک (LT^{-1}) و D ضریب پخش (L^2T^{-1}) می باشد. به منظور حل این معادله شبیه سازی مربوط به آن در نرم افزار متلب وارد شده و نتایج به دست آمده از آن در شکل ۳، مشاهده می شود. معادله انتقال آلودگی از دو جزء اساسی جابجایی و پخش تشکیل شده است. از این رو پارامترهای اساسی در این مسئله سرعت آلاینده، ضریب پخش و غلظت اولیه



شکل (۳): تغییرات غلظت نیترا ت منتج شده از حل تحلیلی در ستون خاک

تمیز به شبکه و در قسمت خروجی هم یک گره بعنوان گره تخلیه می باشد و همچنین یک گره به مخزن متصل است.) و اولیه مطابق با مدل آزمایشگاهی به مدل عددی اعمال شد. جدول ۱، نتایج سه نرم افزار را با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه می کند. مطابق با این جدول، نرم افزار EPANET-BAM به خوبی و با خطای نسبی حداکثر ۲/۶ درصد غلظت کلر باقی مانده در گره های شبکه را پیش بینی می کند. همان طور که مشاهده می شود غلظت در تمامی گره ها در دو مدل عددی

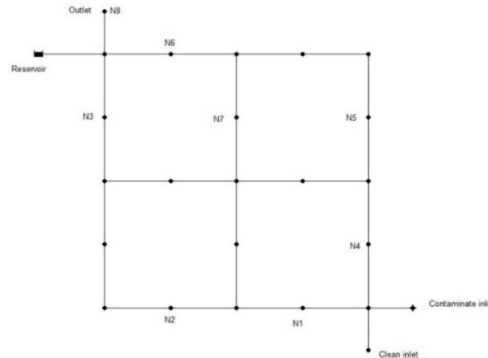
صحت سنجی و کالیبراسیون نرم افزارهای مورد استفاده

به منظور مقایسه و بررسی سه مدل عددی از نتایج شبکه ارائه شده توسط (Ho et al., 2007)، استفاده شد. تصویری از این مدل آزمایشگاهی در شکل ۴، نشان داده شده است. این مدل دارای سه گره با اتصالات ورودی و خروجی مجاور است. مدل آزمایشگاهی هوو و همکاران در سه مدل عددی مدل سازی شد و شرایط مرزی (یک گره تزریق آب آلوده و یک گره تزریق آب



آزمایشگاهی نشان می‌دهد. علت بهتر بودن نتایج مدل عددی EPANET-BAM نسبت به نتایج ۲ مدل دیگر این است که این مدل عددی در محل تلاقی گره‌هایی که به صورت اتصالات متقابل، با ورودی و خروجی مجاور وجود دارد، فرض اختلاط کامل را در نظر نمی‌گیرد.

EPANET و WATERGEMS بعد از به تعادل رسیدن مقدار ثابت و برابر ۰/۵۵۵ میلی‌گرم بر لیتر است که علت آن این است که این دو نرم‌افزار، اختلاط محلول را در گره‌ها به صورت اختلاط کامل فرض می‌کنند؛ اما در مدل EPANET-BAM غلظت برای گره‌ها دیگر ثابت نیست و مقادیر متفاوت و متناسب به نتایج



شکل (۴): مدل آزمایشگاهی هوو و همکاران (Ho et al., 2007)

استان) در شمال استان سیستان و بلوچستان قرار دارد. با توجه به اقلیم منطقه، آب‌وهوای شدیداً گرم و خشک بر این شهر حکم فرماست. نحوه توزیع آب در شهر زاهدان به صورت ثقلی صورت می‌گیرد. این شهر دارای دو شبکه آبرسانی شماره یک و دو می‌باشد که محدوده آن‌ها در شکل ۵، نشان داده شده است.

معرفی محدوده مطالعاتی

استان سیستان و بلوچستان با وسعت حدود ۱۸۷۵۰۲ کیلومتر مربع معادل ۱۱/۵ درصد کشور را به خود اختصاص داده است. شهرستان زاهدان به عنوان مرکز استان سیستان و بلوچستان دارای مساحتی حدود ۳۶۵۸۱ کیلومتر مربع (حدود ۲۰ درصد کل سطح

جدول (۱): مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی هوو و همکاران با سه مدل عددی

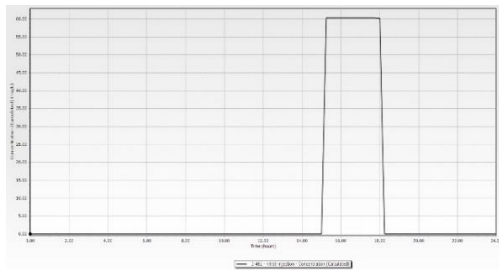
نام گره	غلظت آزمایشگاهی هوو و همکاران (mg/l)	غلظت نرم‌افزارهای EPANET و WATERGEMS (mg/l)	درصد خطای نسبی EPANET و WATERGEMS	غلظت نرم‌افزار EPANET-BAM (mg/l)	درصد خطای نسبی EPANET-BAM
N1	0.33	0.555	68	0.33	0
N2	0.33	0.555	68	0.33	0
N3	0.38	0.555	46	0.39	2.6
N4	0.8	0.555	31	0.78	2.5
N5	0.8	0.555	31	0.78	2.5
N6	0.73	0.555	24	0.72	1.4
N7	0.68	0.555	18	0.67	1.5
N8	0.64	0.555	13	0.64	0

تعیین نقاط مستعد ورود آلودگی به شبکه

برای تعیین نقاطی که پتانسیل ورود آلودگی به شبکه را دارند بایستی بر اساس ویژگی‌های نشت و همچنین ویژگی‌های فشار گذرا در شبکه اقدام به انتخاب آن‌ها نمود. اداره آب آمریکا در سال ۲۰۰۷، در نتیجه بررسی‌های میدانی ویژگی‌هایی را ارائه داده



شکل (۵): تقسیم‌بندی شبکه آبرسانی شهر زاهدان



شکل (۷): سناریوی ورود نیترات به شبکه آب

چهار گره از شبکه به صورت تصادفی انتخاب شدند تا نتایج ارائه شده توسط هر مدل عددی برای غلظت نیترات در گره مورد نظر بررسی شود. جدول ۲، نتایج سه مدل عددی برای چهار گره تصادفی را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که سه مدل عددی از لحاظ زمان رسیدن آلودگی و باقی ماندن آلودگی در گره‌های مورد نظر با یکدیگر یکسان و مشابه می‌باشد؛ اما از لحاظ غلظت حداکثر نیترات در گره‌ها، همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد دو مدل عددی Water GEMS و EPANET نتایجی یکسان ارائه کردند. اما مدل عددی EPANET-BAM مقدار غلظت حداکثر متفاوتی برای نیترات نسبت به دو مدل عددی دیگر ارائه کرد که علت تفاوت در غلظت به این دلیل است که این نرم‌افزار در اتصالات متقابل، با ورودی و خروجی مجاور فرض اختلاط کامل را در نظر نمی‌گیرد. حال نحوه رفتار شبکه آب شهر زاهدان برای تمامی گره‌ها را در نرم‌افزارهای EPANET-BAM و EPANET از لحاظ کیفی مورد بررسی قرار گرفته است. (با توجه اینکه نتایج دو مدل عددی EPANET و Water GEMS یکسان و مشابه بودند لذا فقط نتایج مدل EPANET بیان گردیده است). تعداد گره‌های شبکه آب شرب شهر زاهدان با غلظت بالای ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر (غیرمجاز) و همچنین تعداد گره‌هایی که غلظتی بین ۴۰ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر دارند (نزدیک به ناحیه غیرمجاز) و تعداد گره‌هایی که غلظتی بالاتر از صفر دارند (آلوده شده‌اند) در ساعات مختلف روز پس از تزریق آلودگی به شبکه بررسی شده‌اند. جدول ۳، نتایج حاصل از دو مدل عددی EPANET-BAM و EPANET را

است که در آن نقاط با این ویژگی‌ها، دارای بیشترین پتانسیل وقوع فشارهای گذرا هستند. به‌طور خلاصه این نقاط عبارت است از گره‌هایی در شبکه با فشار خیلی بالا و خیلی پایین. لذا بر این اساس گره‌های موجود در شبکه امتیازدهی شده و نقاطی که دارای بیشترین احتمال وقوع چنین رویدادی را دارند انتخاب شده است. محدوده نقاط ورود آلودگی در شکل ۶، نشان داده شده است.



شکل (۶): منطقه مستعد برای ورودی آلودگی به شبکه آب شرب شهر زاهدان

نتایج و بحث

شبیه‌سازی فرایند انتقال-پخش آلودگی نیترات در شبکه

حال که انتقال آلودگی تا مجاورت شبکه‌های لوله شبیه‌سازی شده است، در اثر وقوع یک فشار منفی در نقاطی از شبکه این آلودگی و با همین میزان غلظت وارد شبکه می‌گردد. از بین نقاط مستعد برای ورود آلودگی تعداد ۴ نقطه (گره) انتخاب شدند و مقدار $60/33$ میلی‌گرم بر لیتر نیترات از این نقاط به شبکه وارد شد.

یک الگوی زمانی برای ورود آلودگی معرفی شده که در شکل ۷، قابل مشاهده است بدین صورت که با کاهش فشار و در پی آن وقوع فشار منفی در ساعت ۱۵ ورود آلودگی انجام شده و در ساعت ۱۷ با عادی شدن جریان ورود آلودگی قطع شده است. لازم به ذکر است که شرایط مرزی و اولیه برای هر سه نرم‌افزار مورد استفاده کاملاً یکسان و مشابه می‌باشد. همچنین مدت اجرای نرم‌افزار ۲۴ ساعت انتخاب شده است.



که با اثبات دقت بالاتر نتایج مدل EPANET-BAM می‌توان اظهار داشت که این نتایج این مدل قابل اعتمادتر می‌باشد.

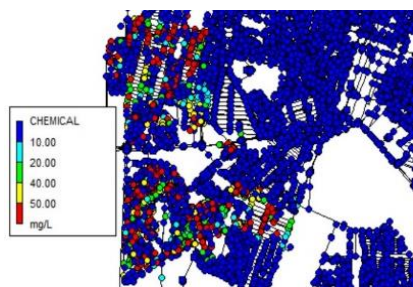
نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود خروجی مدل عددی EPANET-BAM از منظر تعداد گره‌های با غلظت غیرمجاز کمتر از مدل EPANET می‌باشد

جدول (۲): نتایج سه مدل عددی برای گره‌های انتخاب شده

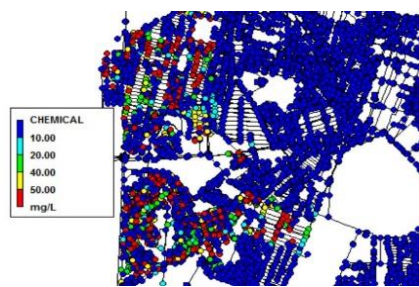
نام گره	حداکثر غلظت در EPANET (mg/l)	بازه زمانی ماند آلودگی در گره توسط EPANET	حداکثر غلظت در Water GEMS (mg/l)	بازه زمانی ماند آلودگی در گره توسط Water GEMS	حداکثر غلظت در EPANET-BAM (mg/l)	بازه زمانی ماند آلودگی در گره توسط EPANET-BAM
J-21457a	۵۷/۶۰	۱۶:۰۰-۲۱:۳۰	۵۷/۶۳	۱۶:۰۰-۲۱:۳۰	۵۷/۶۰	۱۶:۰۰-۲۱:۳۰
J-717	۵۹/۴۴	۲۱:۴۵-۲۴:۰۰	۵۹/۴۶	۲۱:۳۰-۲۴:۰۰	۵۹/۴۴	۲۱:۴۵-۲۴:۰۰
J-183	۵۸/۳۸	۱۹:۴۵-۲۴:۰۰	۵۹/۱	۱۹:۴۵-۲۳:۴۵	۵۹/۰۵	۱۹:۴۵-۲۴:۰۰
J-1227	۵۷/۶۳	۱۶:۰۰-۲۱:۱۵	۵۷/۶۲	۱۶:۰۰-۲۱:۱۵	۵۷/۶۳	۱۶:۰۰-۲۱:۱۵

جدول (۳): نتایج دو مدل عددی EPANET و EPANET-BAM

نتایج در ساعت ۱۷ (دو ساعت پس از تزریق آلودگی به شبکه)			
تعداد گره‌ها با غلظت بین ۴۰ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر	تعداد گره‌ها با غلظت بیشتر از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر	تعداد گره‌های آلوده شده	مدل عددی
۳	۴۸	۶۰	EPANET-BAM
۳	۴۸	۶۰	EPANET
نتایج در ساعت ۱۹ (چهار ساعت پس از تزریق آلودگی به شبکه)			
تعداد گره‌ها با غلظت بین ۴۰ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر	تعداد گره‌ها با غلظت بیشتر از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر	تعداد گره‌های آلوده شده	مدل عددی
۱۴	۱۵۴	۲۵۹	EPANET-BAM
۱۱	۱۵۵	۲۶۰	EPANET
نتایج در ساعت ۲۲ (هفت ساعت پس از تزریق آلودگی به شبکه)			
تعداد گره‌ها با غلظت بین ۴۰ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر	تعداد گره‌ها با غلظت بیشتر از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر	تعداد گره‌های آلوده شده	مدل عددی
۹۷	۴۷۴	۱۱۲۴	EPANET-BAM
۹۶	۴۷۶	۱۱۸۲	EPANET
نتایج در ساعت ۲۴ (نه ساعت پس از تزریق آلودگی به شبکه)			
تعداد گره‌ها با غلظت بین ۴۰ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر	تعداد گره‌ها با غلظت بیشتر از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر	تعداد گره‌های آلوده شده	مدل عددی
۱۷۶	۵۶۹	۱۷۷۳	EPANET-BAM
۱۶۴	۵۷۴	۱۹۳۷	EPANET



الف) مدل عددی EPANET-BAM



ب) مدل عددی EPANET

شکل (۸): نحوه توزیع نیترات در شبکه آب شهر زاهدان (۹ ساعت پس از تزریق آلاینده) در دو مدل عددی

به اینکه تعداد گره‌های شبکه موردنظر زیاد است به بررسی تعدادی از گره‌های شبکه به صورت اتفاقی در هر سه مدل عددی پرداخته شده است. شبکه موردنظر به ۴ منطقه مختلف، منطقه نزدیک به محل آلودگی (شامل نقاطی که آلودگی در ۱۵ ساعت اول بعد از تزریق آلودگی به شبکه، به آن نقاط می‌رسد؛ یعنی بازه ساعات ۱۵ تا ۳۰ اجرای نرم‌افزار شبیه‌سازی)، منطقه میانه (شامل نقاطی که آلودگی در ۱۵ ساعت دوم بعد از تزریق آلودگی به شبکه، به آن نقاط می‌رسد؛ یعنی بازه ساعات ۳۰ تا ۴۵ اجرای نرم‌افزار شبیه‌سازی)، منطقه دور از محل تزریق آلودگی (شامل نقاطی که آلودگی در ۱۵ ساعت سوم بعد از تزریق آلودگی به شبکه، به آن نقاط می‌رسد؛ یعنی بازه ساعات ۴۵ تا ۶۰ اجرای نرم‌افزار شبیه‌سازی) و منطقه خیلی دور از محل تزریق آلودگی (شامل نقاطی که آلودگی در ۱۵ ساعت چهارم بعد از تزریق آلودگی به شبکه، به آن نقاط می‌رسد؛ یعنی بازه ساعات ۶۰ تا ۷۵ اجرای نرم‌افزار شبیه‌سازی)، تقسیم شده است. لازم به ذکر است که برای بررسی زمان ماندن آلودگی در گره‌های شبکه زمان اجرای نرم‌افزار برابر با ۷۵ ساعت انتخاب شده است بطوریکه فقط در ساعات ۱۵ تا ۱۷ روز اول، آلودگی به شبکه تزریق شده است و بقیه ساعات آلودگی وارد شبکه نشده است.

بررسی زمان ماند برای منطقه نزدیک

در مرحله اول به بررسی دو گره (که به صورت اتفاقی انتخاب شده‌اند) از منطقه نزدیک پرداخته شده است.

شکل ۸، نتایج دو مدل عددی را در ساعت ۲۴ (۹ ساعت پس از تزریق آلودگی به شبکه) نشان می‌دهند که یک دید عمومی مناسب از منظر مناطق درخطر ریسک ناشی از ورود آلودگی را به بهره‌بردار پس از ورود آلاینده به شبکه ارائه می‌دهد.

تحلیل و بررسی سناریوهای مدیریتی کنترل آلودگی

در قسمت قبل سناریوی بررسی وضعیت کیفی شبکه آب شرب شهر زاهدان به صورت پدافند غیرعامل مدنظر قرار گرفت. حال در این بخش راهکارهایی جهت مدیریت و کنترل آلودگی مدنظر این پژوهش (نیترات) ارائه می‌گردد. این راهکارهای مدیریت کیفی عبارت است از زمان ماند و جریان رقیق‌ساز. این دو ابزار مدیریت کیفی منابع آب، ابزارهایی کارا هستند که در مواقع لزوم کارایی مناسبی دارند (Darmian et al., 2018; Monfared et al., 2017; Farhadian et al., 2014).

زمان ماند

زمان ماند عبارت است از زمانی که بایستی به آب داده شود تا در اثر عامل پخشیدگی معادله انتقال آلودگی، غلظت غیرمجاز به مجاز تبدیل گردد (Darmian et al., 2018). شایان ذکر است که در این مدت زمان نباید از محل گره موردنظر آب برداشت گردد. در این بخش به بررسی زمان ماندن آلودگی (نیترات) در گره‌های شبکه آب شهر زاهدان می‌پردازیم. با توجه



در مرحله سوم به بررسی دو گره (که به صورت اتفاقی انتخاب شده‌اند) از منطقه دور در سه مدل عددی پرداخته شده است. جدول ۶، نتایج سه مدل برای دو گره J-1289 و J-16606 انتخابی را نشان می‌دهد.

بررسی زمان ماند برای منطقه خیلی دور

در مرحله چهارم به بررسی دو گره (که به صورت اتفاقی انتخاب شده‌اند) از منطقه خیلی دور در سه مدل عددی پرداخته شده است. جدول ۷، نتایج سه مدل برای دو گره J-5796 و J-5804 انتخابی را نشان می‌دهد.

جدول ۴، نتایج سه مدل برای دو گره J-22445 و J-1227 انتخابی را نشان می‌دهد.

بررسی زمان ماند برای منطقه میانه

در مرحله دوم به بررسی دو گره (که به صورت اتفاقی انتخاب شده‌اند) از منطقه میانه در سه مدل عددی پرداخته شده است. جدول ۵، نتایج سه مدل برای دو گره J-14097 و J-5803 انتخابی را نشان می‌دهد.

بررسی زمان ماند برای منطقه دور

جدول (۴): نتایج سه مدل عددی برای گره‌های منطقه نزدیک

مدل عددی	گره J-22445		گره J-1227	
	مدت زمان وجود	مدت زمانی که غلظت بیشتر از مقدار مجاز است	مدت زمان وجود آلودگی در گره	مدت زمانی که غلظت بیشتر از مقدار مجاز است
Water GEMS	۳ ساعت و ۱۵ دقیقه	۲ ساعت و ۳۰ دقیقه	۵ ساعت و ۱۵ دقیقه	۲ ساعت و ۱۵ دقیقه
EPANET	۳ ساعت و ۳۰ دقیقه	۳ ساعت	۵ ساعت و ۱۵ دقیقه	۲ ساعت و ۱۵ دقیقه
EPANET-BAM	۳ ساعت و ۳۰ دقیقه	۳ ساعت	۵ ساعت و ۱۵ دقیقه	۲ ساعت و ۱۵ دقیقه

جدول (۵): نتایج سه مدل عددی برای گره‌های منطقه میانه

مدل عددی	گره J-14097		گره J-5803	
	مدت زمان وجود	مدت زمانی که غلظت بیشتر از مقدار مجاز است	مدت زمان وجود آلودگی در گره	مدت زمانی که غلظت بیشتر از مقدار مجاز است
Water GEMS	۳ ساعت و ۴۵ دقیقه	۲ ساعت	۶ ساعت	۱ ساعت و ۱۵ دقیقه
EPANET	۴ ساعت	۱ ساعت و ۴۵ دقیقه	۶ ساعت	۱ ساعت
EPANET-BAM	۴ ساعت	۱ ساعت و ۴۵ دقیقه	۶ ساعت	۱ ساعت

جدول (۶): نتایج سه مدل عددی برای گره‌های منطقه دور

مدل عددی	گره J-16606		گره J-1289	
	مدت زمان وجود	مدت زمانی که غلظت بیشتر از مقدار مجاز است	مدت زمان وجود آلودگی در گره	مدت زمانی که غلظت بیشتر از مقدار مجاز است
Water GEMS	۶ ساعت	۴۵ دقیقه	۵ ساعت	۱ ساعت و ۱۵ دقیقه
EPANET	۶ ساعت	۴۵ دقیقه	۴ ساعت و ۴۵ دقیقه	۱ ساعت و ۱۵ دقیقه
EPANET-BAM	۶ ساعت	۴۵ دقیقه	۵ ساعت	۱ ساعت و ۱۵ دقیقه

جدول (۷): نتایج سه مدل عددی برای گره‌های منطقه خیلی دور

مدل عددی	گره J-5796		گره J-5804	
	مدت زمان وجود	مدت زمانی که غلظت بیشتر از مقدار مجاز است	مدت زمان وجود آلودگی در گره	مدت زمانی که غلظت بیشتر از مقدار مجاز است
Water GEMS	۶ ساعت	۳۰ دقیقه	۶ ساعت	۴۵ دقیقه
EPANET	۶ ساعت	۳۰ دقیقه	۵ ساعت و ۴۵ دقیقه	۴۵ دقیقه
EPANET-BAM	۶ ساعت	۳۰ دقیقه	۶ ساعت	۴۵ دقیقه

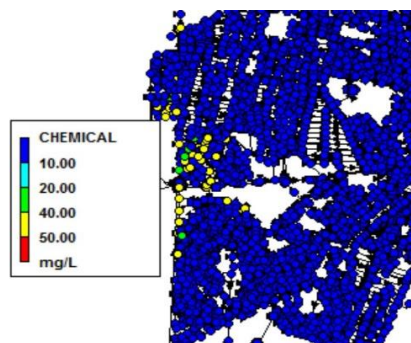
جریان رقیق‌ساز

جریان رقیق‌ساز ابزاری کارا و مقرون‌به‌صرفه جهت مدیریت کیفی سیستم‌های منابع آب می‌باشد. در این قسمت از تحقیق با رویکرد پدافند غیرعامل پس از ورود آلودگی به شبکه آب شرب شهر زاهدان، به عملیات حفاظت کیفی شبکه پرداخته شده است. برای این هدف و به منظور رقیق‌سازی در این پروژه از مخازنی که نزدیک به محل تزریق آلودگی هستند، استفاده شده است تا با حداقل هزینه ممکن پروسه‌ی حفاظت و مدیریت کیفی شبکه انجام گیرد. با توجه به اینکه آلودگی از گره‌های متعدد (تعداد ۴ گره) و در مکان‌های متعدد به شبکه موردنظر وارد شده است، لذا جهت اصلاح کیفیت آب شبکه از ابزار جریان رقیق‌ساز استفاده شده است که جریان موردنیاز از نزدیک‌ترین مخازن موجود در شبکه به منظور کاهش زمان تماس آلودگی غیرمجاز و بهینه کردن هزینه‌ها تأمین می‌گردد. جدول ۸، خروجی‌های ابزار جریان رقیق‌ساز برای بهبود کیفیت آب در مدل‌های عددی EPANET، EPANET-BAM، Water GEMS را نشان می‌دهد. شایان‌ذکر است که گره‌هایی که به صورت دوتایی وارد شده‌اند به این دلیل است که این گره‌ها در شبکه پشت سر هم قرار گرفته‌اند. شکل ۹، شبکه آب شهر زاهدان پس از رقیق‌سازی و در ساعت ۱۸ (یک ساعت پس از اتمام تزریق آلودگی به شبکه) را نشان می‌دهد همان‌طور که مشاهده می‌شود هیچ‌کدام از گره‌ها دیگر غلظتی بیشتر از مقدار مجاز ندارند.

با بررسی راهکار زمان ماند آلودگی برای کنترل آلودگی در گره‌های مختلف شبکه در هر سه مدل عددی مشاهده شد که در گره‌های نزدیک به محل تزریق آلودگی (ناحیه نزدیک)، زمان ماند برای آلودگی غیرمجاز از گره‌هایی که از محل تزریق آلودگی دورتر بودند (ناحیه خیلی دور)، بیشتر بود؛ بنابراین می‌توان گفت که در هنگام ورود آلودگی غیرمجاز به شبکه، نقاط نزدیک به محل تزریق دارای تنش بیشتری نسبت به نقاط میانه، دور و خیلی دور می‌باشند و بایستی زمان ماند بیشتری برای اصلاح کیفیت آب، داده شود. به عبارت دیگر برای شبکه در مناطق نزدیک، بایستی مدت‌زمان بیشتری برداشت ممنوع اعلام گردد. با مقایسه مدت‌زمان وجود آلودگی با غلظتی بیشتر از غلظت مجاز برای منطقه میانه نسبت به منطقه نزدیک مشاهده شد که این مدت‌زمان در منطقه میانی با کاهش ۳۳ تا ۵۰ درصدی نسبت به منطقه نزدیک همراه است. همچنین با مقایسه مدت‌زمان وجود آلودگی با غلظتی بیشتر از غلظت مجاز برای منطقه دور نسبت به منطقه میانه مشاهده شد که این مدت‌زمان در منطقه دور با کاهش ۲۵ تا ۳۷/۵ درصدی نسبت به منطقه میانه همراه است (منطقه دور نسبت به منطقه نزدیک با کاهش ۵۸ تا ۶۲/۵ درصدی همراه بود). مقایسه مدت‌زمان وجود آلودگی با غلظتی بیشتر از غلظت مجاز برای منطقه خیلی دور نسبت به منطقه دور نشان داد که این مدت‌زمان در منطقه خیلی دور با کاهش ۳۳ تا ۴۰ درصدی نسبت به منطقه دور همراه است (منطقه خیلی دور نسبت به منطقه نزدیک با کاهش ۷۵ درصدی همراه بود).



حجم آب مشخص به‌عنوان جریان رقیق‌ساز در نقاط مختلف ورود آلودگی به شبکه، رهاسازی گردد. این مقدار جریان کاملاً وابسته به دبی لوله‌ی مواصله به گره مذکور می‌باشد. به این معنا که اگر دبی لوله زیاد باشد جریان رقیق‌ساز بیشتری برای اصلاح کیفیت آب شبکه موردنیاز است. لازم به ذکر است که در مواقعی که آلودگی از چندین نقطه به شبکه وارد می‌شود، جریان رقیق‌ساز بهینه نیز باید از چند نقطه به شبکه تزریق گردد. مقدار جریان رقیق‌ساز به‌دست‌آمده برای شبکه توزیع آب شهر زاهدان به‌منظور بهبود وضعیت کیفی آب و مجاز شدن غلظت آلودگی در شبکه، بین ۱۰/۶ تا ۱۵/۹ درصد دبی پایه لوله محاسبه گردید که می‌تواند به‌عنوان یک الگو در شبکه در شرایط بحرانی بکار گرفته شود.



شکل (۹): وضعیت نرمال شبکه بعد از استفاده از ابزار مدیریت کیفی جریان رقیق‌ساز سه ساعت پس از ورود آلودگی به شبکه

پس از استفاده از جریان رقیق‌ساز به‌عنوان یک راهکار مدیریت و کنترل کیفی شبکه آب شهر زاهدان، تأثیر مثبت و کارآمد این ابزار کنترل کیفی به اثبات رسید. در طی این فرآیند مشاهده شد که بایستی یک

جدول (۸): نتایج سه مدل عددی جهت رقیق‌سازی شبکه آب شرب

گره (های) تزریق آلودگی	حداقل مقدار آب موردنیاز جهت رقیق‌سازی (L/S)		
	Water GEMS	EPANET	EPANET-BAM
J-1345 و J-21244	۱۶/۰۵	۱۶/۰۶	۱۶/۰۶
J-12307	۴۸/۳۰	۴۸/۳۰	۴۸/۳۰
J-461	۱۶/۴۱	۱۶/۴۲	۱۶/۴۲

WATERGEMS برابر ۳۷/۴ درصد است. لذا در حالت تقاطع ورودی و خروجی مجاور به علت وقوع اختلاط ناقص نتایج مدل EPANET-BAM قابل‌اعتمادتر بوده و نزدیک‌تر به واقعیت است. پس‌از آن سناریوی شبیه‌سازی ۲۴ ساعته شبکه پس از وقوع آلودگی در ساعت ۱۵ تا ۱۷ به شبکه آب شهر زاهدان موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد تعداد گره‌های آلوده‌شده شبکه در دو مدل عددی WATERGEMS و EPANET برای سناریوی مذکور برابر ۱۹۳۷ گره و در مدل عددی EPANET-BAM برابر ۱۷۷۳ گره می‌باشد که کاهش ۸/۵ درصدی تعداد گره‌های آلوده‌شده بین نتایج دو مدل WATERGEMS و EPANET با مدل EPANET-BAM را در سناریو بیان می‌کند. در پایان به‌منظور مدیریت بحران، دو ابزار کارآمد زمان ماند و جریان رقیق‌ساز برای کنترل کیفی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی شبکه آب شرب زاهدان به کمک سه مدل عددی EPANET، WATERGEMS و EPANET-BAM پرداخته‌شده که نتایج صحت‌سنجی و کالیبراسیون مدل‌های مذکور نشان داد که سه مدل به لحاظ هیدرولیکی نتایج یکسان و مشابهی ارائه می‌دهند اما از لحاظ کیفی چنانچه در شبکه تقاطع لوله‌ها از نوع ورودی و خروجی مجاور باشد، نتایج کیفی مدل عددی EPANET-BAM از دو مدل دیگر بهتر می‌باشد. متوسط خطای نسبی بین این مدل و مدل آزمایشگاهی هوو و همکاران برابر ۱/۳۱ درصد می‌باشد، درحالی‌که متوسط خطای نسبی برای دو مدل EPANET و

به‌عنوان جریان رقیق‌ساز در نقاط مختلف ورود آلودگی به شبکه، اصلاح کیفیت آب حاصل شد و غلظت نیترات به زیر مقدار ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر رسید. در مواقعی که آلودگی از چندین نقطه به شبکه وارد می‌شود، جریان رقیق‌ساز بهینه نیز باید از چند نقطه به شبکه تزریق گردد. لازم به ذکر است که مقدار جریان رقیق‌ساز به‌دست‌آمده برای شبکه توزیع آب شهر زاهدان به‌منظور بهبود وضعیت کیفی آب و مجاز شدن غلظت آلودگی در شبکه، بین ۱۰/۶ تا ۱۵/۹ درصد دبی پایه لوله محاسبه گردید که می‌تواند به‌عنوان یک الگو در شبکه در شرایط بحرانی بکار گرفته شود.

در شبکه مورد شبیه‌سازی واقع شدند. برای محاسبه ابزار زمان ماند، شبکه به چهار بخش نزدیک، میانه، دور و خیلی دور تقسیم گردید که اساس این طبقه‌بندی برپایه زمان رسیدن آلودگی به این مناطق در بازه‌های ۱۵ ساعتی تا ۶۰ ساعت تقسیم‌بندی شد. نتایج نشان داد که زمان ماند لازم به‌منظور اصلاح کیفیت آب برای گره‌های ناحیه خیلی دور به نسبت گره‌های ناحیه نزدیک، کمتر می‌باشد و برای منطقه خیلی دور نسبت به ناحیه نزدیک با کاهش ۷۵ درصدی همراه بود. پس از آن تأثیر مثبت و کارآمد جریان رقیق‌ساز به‌عنوان یک راهکار مدیریت و کنترل کیفی شبکه نیز به اثبات رسید. به‌این‌ترتیب که با رهاسازی یک حجم آب مشخص

منابع

- حریف، س.، دهقانی درمیان، م.، عزیزیان، غ.، فقیهی راد، ش.، مشکاتی، س.، ه و بابایی، م.، م. ۱۴۰۲. جانمایی بهینه سنسورهای تشخیص آلاینده در شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۱۳، ص ۲۲۸-۲۱۱.
- سلگی، ع و م، نصیری. ۱۳۹۸. پهنه‌بندی برخی پارامترهای کیفی آب شرب با استفاده از GIS مطالعه موردی: شهر ملایر. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۹، شماره ۴، ص ۱۹۰-۱۷۷.
- قنادی، م. ۱۳۸۲. راهبردهای کنترل کیفیت در شبکه‌های توزیع آب. فصلنامه آب و محیط‌زیست. ص ۱۱-۴
- کیانی، س.، فتحی مقدم، م.، فتحی، ا و ع. حقیقی. ۱۳۹۷. مدل‌سازی عددی جریان گذرا در شبکه آب‌رسانی ویسکوالاستیک. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۹ شماره ۱، ص ۷۵-۶۱.
- منزوی، م. ت. ۱۳۸۸. آب‌رسانی شهری. تهران، موسسه انتشارات دانشگاه تهران.
- مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. استاندارد ملی ایران ۱۰۵۳ آب آشامیدنی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی تجدید نظر پنجم.
- میری خمبی، س.، م و ع. افشار. ۱۳۹۳. جانمایی بهینه حسگرها در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم جامعه مورچه‌ها: چشم‌انداز کاربرد دوگانه. مجله آب و فاضلاب دوره ۲۵ شماره ۹۱.
- نصیرپور، ح.، نصیریان، علی و ا. اکبرپور. ۱۳۹۸. تعیین موقعیت بهینه شیرهای فشارشکن در شبکه توزیع آب مطالعه موردی: شبکه توزیع آب شهر بیرجند. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، دوره ۱۰، شماره ۱، ص ۳۳-۱۷.
- Almandoz J., E, Cabrera., F, Arregui., E. J, Cabrera and R, Cobacho. 2005. Leakage assessment through water distribution network simulation. J. of Water Resour. Plan. Manage. 131(6): 458-466.
- Balbus, J.M. and M.E, Lang. 2001. Is the water safe for my baby?. Pediatric Clinics of North America, 48(5), pp.1129-1152.
- Besner, M.C., R, Broséus., J, Lavoie., G.D, Giovanni., P, Payment and M, Prévost. 2009. Pressure monitoring and characterization of external sources of contamination at the site of the Payment drinking water epidemiological studies. Environmental science & technology, 44(1), 269-277.

- Cooper, W. J. 2014. Responding to crisis: The West Virginia chemical spill.
- Corso, P.S., M.H, Kramer., K.A, Blair., D.G, Addiss., J.P, Davis and A.C, Haddix. 2003. Costs of illness in the 1993 waterborne Cryptosporidium outbreak, Milwaukee, Wisconsin. *Emerging infectious diseases*, 9(4), p.426.
- Darmian, M. D., S. A. H, Monfared., G, Azizyan., S. A, Snyder and J. P, Giesy. 2018. Assessment of tools for protection of quality of water: Uncontrollable discharges of pollutants. *Ecotoxicology and environmental safety*, 161, 190-197.
- Farhadian, M., O.B, Haddad., S, Seifollahi-Aghmiuni and H.A, Loáiciga. 2014. Assimilative capacity and flow dilution for water quality protection in rivers. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 19(2), p.04014027.
- Greer, F.R. and M, Shannon. 2005. Infant methemoglobinemia: the role of dietary nitrate in food and water. *Pediatrics*, 116(3), pp.784-786.
- Hammer, M.J. 2000. *Water and Wastewater Technologies*. 2nded. John Wiley and Sons, NewYork, 137-157.
- Harif, S., Azizyan, G., Dehghani Darmian, M. and Givehchi, M., 2023. Selecting the best location of water quality sensors in water distribution networks by considering the importance of nodes and contaminations using NSGA-III (case study: Zahedan water distribution network, Iran). *Environmental Science and Pollution Research*, 30(18), pp.53229-53252.
- Ho, C. K., C. Y, Choi and S. A, McKenna. 2007. Evaluation of complete and incomplete mixing models in water distribution pipe network simulations. In *World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat*, 1-12.
- Ho, C.K., Jr, L, Orear., J.L, Wright and S.A, McKenna. 2008. Contaminant mixing at pipe joints: Comparison between laboratory flow experiments and computational fluid dynamics models. In *Water Distribution Systems Analysis Symposium*, 1-18
- LeChevallier, M. W., R. W, Gullick., M. R, Karim., M, Friedman and J. E, Funk. 2003. The potential for health risks from intrusion of contaminants into the distribution system from pressure transients. *Journal of Water and Health*, 1(1), 3-14.
- McGhee, T. J and E. W, Steel. 1991. *Water supply and sewerage (Vol. 6)*. New York: McGraw-Hill.
- Monfared, S. A. H., M. D, Darmian., S. A, Snyder.,G, Azizyan.,B, Pirzadeh and M. A, Moghaddam. 2017. Water quality planning in rivers: assimilative capacity and dilution flow. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 99(5), 531-541.
- Romero-Gomez, P., C.Y, Choi., B, van Bloemen Waanders and S, McKenna. 2008. Transport phenomena at intersections of pressurized pipe systems. In *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 1-20.
- Soudani, A., M, Chiban., M, Zerbet and F, Sinan. 2011. Use of Mediterranean plant as potential adsorbent for municipal and industrial wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 3(8), 199-205.
- Tao, T., Y. J, Lu., X, Fu and K.L, Xin. 2012. Identification of sources of pollution and contamination in water distribution networks based on pattern recognition. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 13(7), 559-570.
- World Health Organization. 2017. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>