ارزیابی اثر تغییرات سن و جنس لوله بر زوال جداره ای کلر در شبکه ی آبرسانی به کمک مدل کیفی – هیدرولیکی EPANET (II)

محمد غیبی [۱]، شهناز دانش [۲،*]، سید محسن کرابی [۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی محیط زیست؛ دانشگاه فردوسی مشهد؛
Mohamadgheibi@ymail.com

۲- عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد؛
Sdanesh@um.ac.ir

۳- عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد؛
Mohsen.karrabi@um.ac.ir

خلاصه

بر اساس استاندارد های بین المللی و داخلی و به منظور تامین بهداشت عمومی جامعه، میزان غلظت کلر باقی مانده در تمام نقاط شبکه ی آبرسانی باید در محدوده ی خاصی قرار داشته باشد. در روش های متداول تصفیه، آب در نقاط انتهایی تصفیه خانه کلرزنی شده و سپس وارد شبکه ی آبرسانی می گردد. کلر تزریقی با مواد موجود در ماتریکس آب (زوال توده ای) و همچنین دیواره ی لوله های شبکه ی توزیع (زوال جداره ای) واکنش داده و غلظت آن کاهش می یابد. میزان زوال جداره ای کلر تابعی از عوامل مختلفی از جمله سن و جنس لوله های شبکه ی آبرسانی است. در این پژوهش تاثیر پارامترهای جنس لوله میان گروه های PVC و چدنی و همچنین عمر لوله های چدنی در رده های سنی صفر، ۱۰، ۲۰، و ۳۰ سال مورد تحلیل قرار گرفت. ارزیابی تاثیر پارامتر های مذکور از طریق شبیه سازی کیفی – هیدرولیکی در محیط نرم افزاری EPANET (II) محقق گردید. بررسی تاثیر جنس و سن لوله های مختلف بر غلظت کلر باقی مانده در دو حالت کلی صورت پذیرفت. در حالت اول اثر سن و جنس لوله ها بر غلظت کلر باقی مانده ی تمامی گره ها و در ساعت پیک مصرف مورد محاسبه قرار گرفت. در حالت دوم نیز اندرکنش تغییرات سن و جنس لوله بر غلظت کلر باقی مانده در گره شاهد و تمامی سری زمانی الگوی مصرف شبکه ی براشی پلینز بررسی شد. نتایج نشان داد؛ که اختلاف غلظت کلر باقی مانده بین جنس های PVC و چدنی در گره شماره ی (۲۲) و در زمان پیک مصرف ۱۷/۸۲٪ بوده است. همچنین اختلاف غلظت کلر باقی مانده (در گره شماره ی (۲۲) و در زمان پیک) بین سن های صفر و ۳۰ سال ۳۴/۷۱٪ محاسبه گردید. نتیجه ی تحقیق حاضر نشان می دهد که از طریق شبیه سازی کیفی – هیدرولیکی EPANET (II) می توان پارامترهای سن و جنس لوله ها را به عنوان فاکتوری موثر در زوال جداره ای شبکه ی آبرسانی به شمار آورد.

کلمات کلیدی: کلر باقی مانده، شبکه ی آبرسانی، زوال جداره ای کلر، جنس لوله، سن لوله

۱. مقدمه

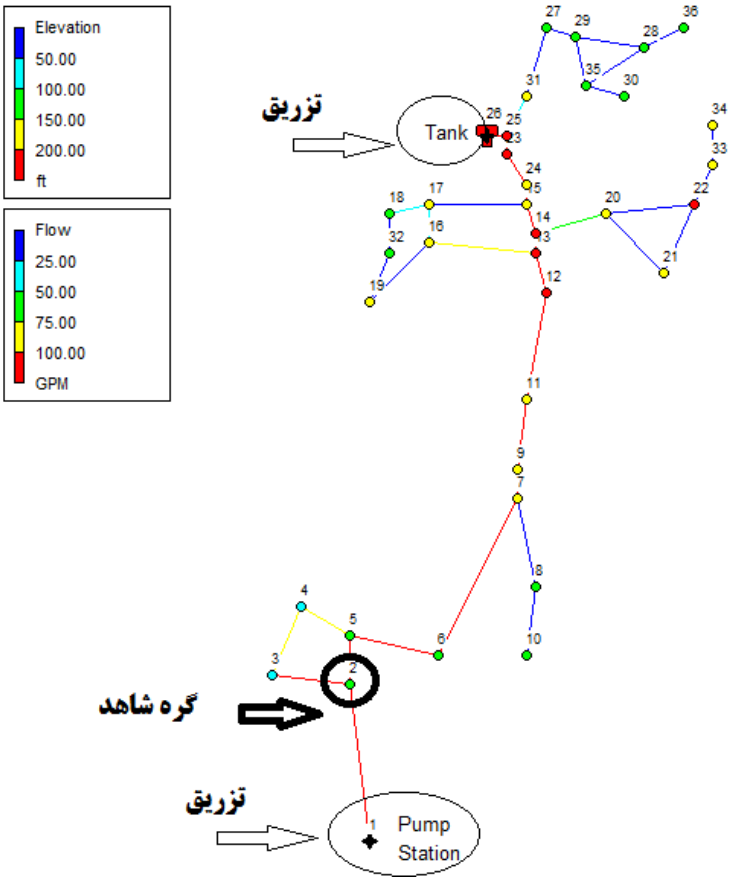
تامین کلر باقی مانده (در محدوده ی تعیین شده توسط استاندارد ها) در شبکه های آبرسانی، تضمین کننده ی کیفیت و استاندارد سلامت آب آشامیدنی می باشد. اما باید توجه داشت که غلظت کلر باقی مانده در تمام نقاط شبکه یکسان نبوده و دارای نواساناتی است. بدین ترتیب که در نقاطی از شبکه مقادیر کلر ممکن است بیش از حد مجاز بوده که این امر منجر به تولید طعم و بو می شود. همچنین در نقاط دیگری از شبکه ممکن است مقادیر کلر باقی مانده از حد مجاز کمتر شود و منجر به بالا رفتن ریسک اپیدمی شدن بیماری های میکروبی گردد. به پدیده ی کاهش کلر در شبکه های آبرسانی، زوال کلر* اطلاق می شود[1]. به عبارت دیگر در یک شبکه ی آبرسانی غلظت کلر ثابت باقی نمی ماند و تحت تاثیر عوامل مختلفی زوال پیدا کرده و کاهش می یابد. کاهش غلظت کلر ناشی از دو نوع مختلف زوال است؛ الف) زوال توده ای که بر اثر ترکیب کلر با مواد آلی موجود در جریان آب اتفاق می افتد ب) زوال جداره ای که بر اثر واکنش های کلر با جداره ی لوله ها در طی مسیر آبرسانی ایجاد می شود[2]. زوال توده ای تابعی از دما و ماتریکس مواد موجود در سیال می باشد؛ در حالیکه زوال دیواره ای به سن و جنس لوله بستگی دارد[3]. بیواس و همکاران (۱۹۹۳) مدلی را جهت پیش بینی غلظت کلر باقی مانده در لوله های شبکه ی آبرسانی ارائه دادند[4]. در ادامه یی و همکاران (۲۰۰۸) به توسعه ی مدل بیسواس در محیط های دو بعدی پرداختند[5]. مونوالی و کومار (۲۰۰۵) به بررسی ارائه ی مدل هایی ابتکاری جهت پیش بینی زوال توده ای و جداره ای کلر در شبکه ی آبرسانی دست زدند[6]. در پژوهشی وبل و همکاران (۱۹۹۱) نرخ زوال کلر در لوله هایی با جنس های مختلف را با یکدیگر مقایسه کردند[7]. در مطالعه ای دیگر، هانت و همکاران (۱۹۹۱) به مطالعه ی نرخ زوال کلر در یک شبکه ی آبرسانی پرداختند. در این پژوهش نرخ زوال کلر با استفاده از رابطه ی درجه ی اول و در نظر گرفتن یک نرخ ثابت برای تمامی لوله ها و منابع ذخیره محاسبه شد[8]. تحقیقات کلارک و همکاران (۱۹۹۳) نشان داد که مقدار کلر باقی مانده (در مسیر شبکه ی آبرسانی) در طول روز متغیر بوده و غلظت آن در مکان های مختلف شبکه به طول مسیر جریان و زمان ماند آب بستگی دارد[9]. راسمن و همکاران (۱۹۹۴) به مطالعه ای حول زوال کلر با رویکرد انتقال جرم در طول مسیر شبکه پرداختند. این پژوهشگران بیان نمودند که نرخ های زوال کلر در توده و در دیواره ی لوله ها از درجه ی اول پیروی می نماید[10]. کوردوبا (۲۰۱۱) با استفاده از اطلاعات و داده های کیفی چهار ساله، اقدام به پیش بینی پارامتر های کیفی سیستم توزیع آب شهر Nasime واقع در جمهوری چک نمود. وی برای پیش بینی از روش رگرسیون چندگانه و مدل کیفی EPANET بهره گرفت[11]. کارمن و موگر (۲۰۱۲) اقدام به محاسبه ی زوال کلر در شبکه ی توزیع شهری با جمعیت ۵۰۰۰۰ نفر کردند. در این پژوهش مشخص شد که واکنش کلر در توده ی سیال و در جداره ی لوله ها از درجه ی اول پیروی می کند. نتیجه ی تحقیقات مذکور نشان داد که نرخ زوال کلر در شبکه متناسب با سرعت جریان و میزان مصرف آب است[12]. در پژوهش حاضر سعی بر این شده است تا با استفاده از شبیه سازی های کیفی – هیدرولیکی، تاثیر سن و جنس لوله های شبکه ی آبرسانی در زوال دیواره ای کلر بررسی گردد.

۲. مواد و روش ها

۲-۱. شبکه مورد مطالعه

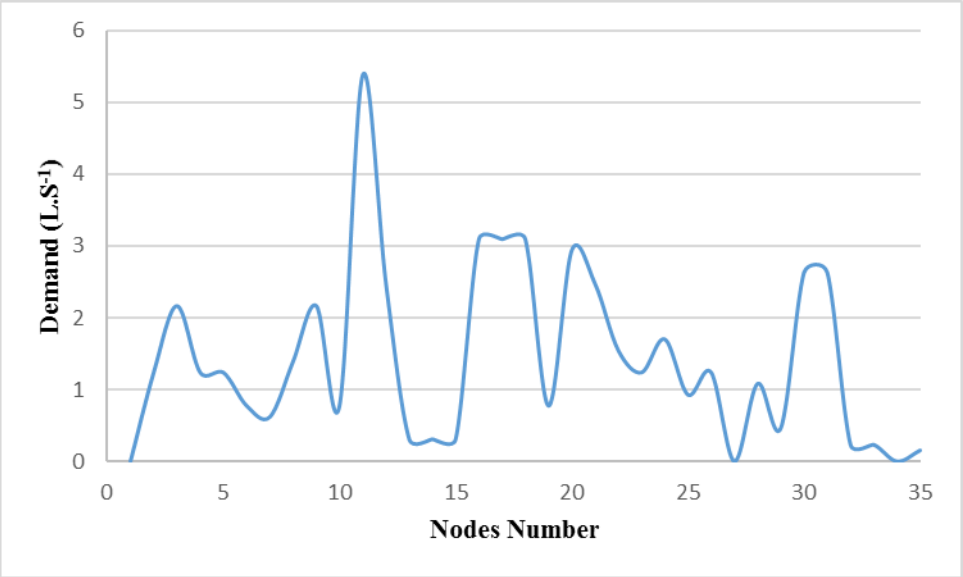
* Chlorine Decay

شبکه ی مورد مطالعه در این پژوهش شبکه ی براشی پلینز مربوط به شهر پلینز جورجیا در ایالات متحده ی آمریکاست. این شبکه به شرحی که در شکل شماره ی (۱) آمده است، دارای ۳۶ گره، یک مخزن و یک ایستگاه پمپاژ می باشد. شایان ذکر است که حداکثر کد ارتفاعی در این شبکه مربوط به مخزن با ارتفاع ۷۰/۵متر و کمترین ارتفاع مربوط به گره شماره ی (۱) با ۱۵/۰۱ متر است[13].

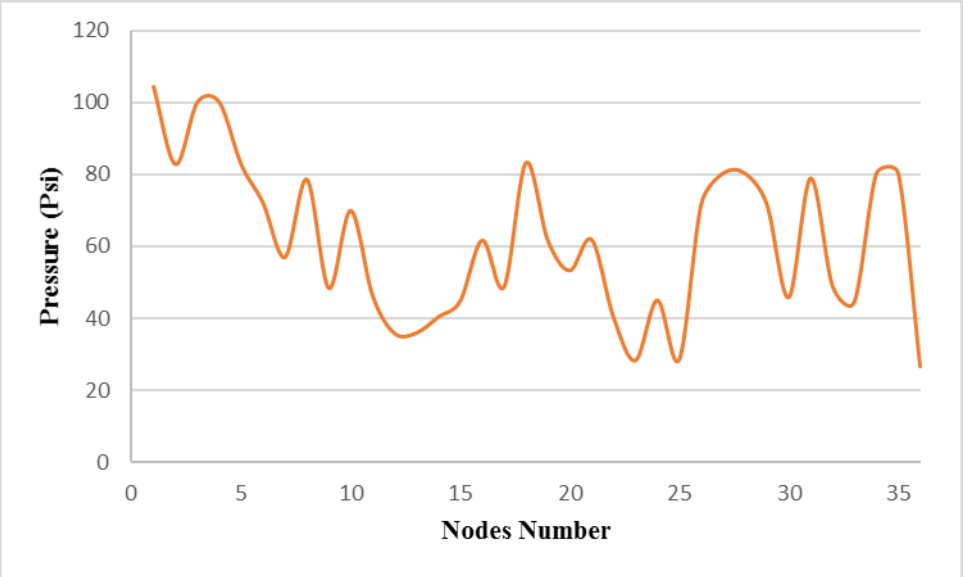


شکل (۱) – شمای کلی از شکل شبکه ی براشی پلینز بر اساس کد ارتفاعی گره های موجود در شبکه[۱۳].

میانگین حداکثر تقاضای ساعتی برای گره های مختلف شبکه ی براشی پلینز در شکل شماره ی (۲) ارائه شده است. شبکه ی مورد مطالعه در طول زمان الگوی مصرف دارای نواسانات فشار بوده که تلرانس های فشار مربوط به حداکثر تقاضای مصرف ساعتی برای تمام گره های شبکه ی مذکور در شکل شماره ی (۳) به نمایش درآمده است. همانطور که در شکل شماره ی (۴) بیان شده است، حداکثر تقاضای ساعتی شبکه در ساعت دهم از بازه ی زمانی ۵۵ ساعته الگوی مصرف اتفاق می افتد.

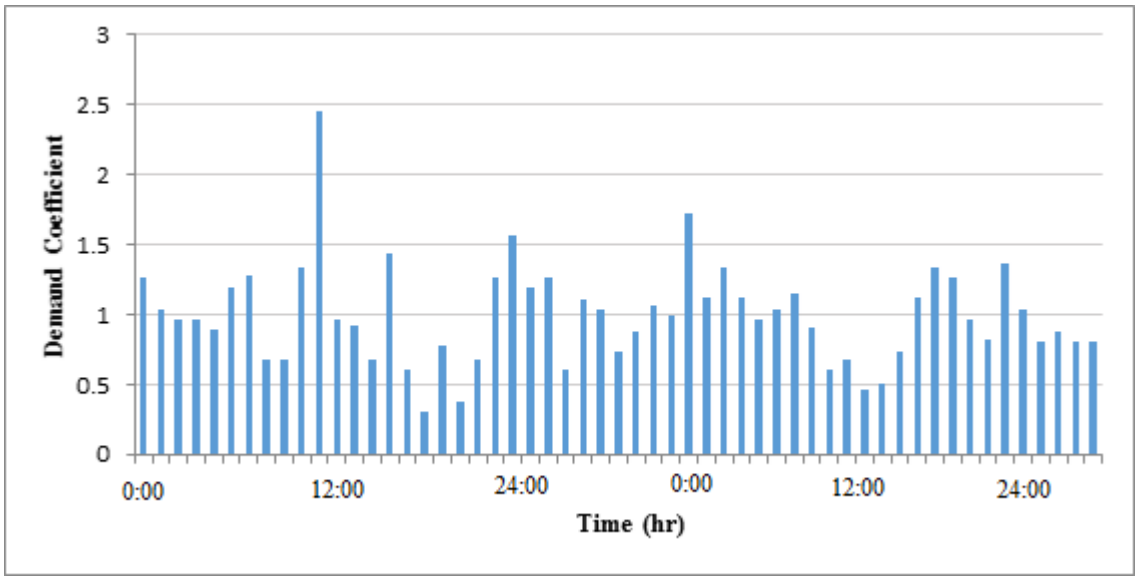


شکل (۲) – میانگین میزان تقاضای حداکثر ساعتی در تمامی گره های شبکه ی براشی پلینز[۱۳]



شکل (۳) – فشار نظیر حداکثر تقاضای ساعتی در تمامی گره های شبکه ی براشی پلینز[۱۳]

در فرآیند شبیه سازی کیفی – هیدرولیکی این شبکه، مقدار ضرایب زوال توده ای ثابت و به ترتیب معادل صفر در نظر گرفته شده است. الگوی مصرف ۵۵ ساعته ی شبکه ی براشی پلینز نیز در شکل شماره ی (۴) به نمایش درآمده است.



شکل (۴) – ضرایب الگوی مصرف آب ۵۵ ساعته در شبکه ی براشی پلینز مورد مطالعه[۱۳].

۲-۲. شبیه سازی کیفی – هیدرولیکی

واکنش بین کلر و جداره ی لوله های شبکه ی توزیع و انتقال آب منجر به کاهش غلظت کلر می گردد. به این نوع کاهش غلظت کلر، زوال جداره ای* اطلاق می گردد. بر اساس رابطه ی شماره ی (۱)، ارائه شده توسط بیواس و همکاران (۱۹۹۳)، رابطه ی مستقیمی میان نرخ زوال جداره ای کلر ($\frac{dC}{dt}$) سطح کاربردی لوله (نسبت سطح به حجم $\frac{A}{V}$)، ضریب انتقال جرم (k_W) و غلظت کلر(C) وجود دارد[14].

(۱)

$$\frac{dC}{dt} = \frac{A}{V} k_W C^n$$

بسیاری از محققین نظیر هالوم و همکاران (۲۰۰۲)، روسمن و همکاران(۲۰۰۷)، میوتوتی و همکاران (۲۰۰۷) و جیسر و همکاران (۲۰۰۷) بر درجه ی اول بودن واکنش زوال جداره ای تاکید داشته و مدل مورد نظر را مطابق با رابطه ی شماره ی (۲) ارائه دادند[15-18].

(۲)

$$\frac{dC}{dt} = \frac{2k_W k_f C}{R(k_W + k_f)}, k_f = sh\frac{D}{d}$$

در رابطه ی فوق، پارامتر های k_W، k_f و R به ترتیب بیانگر ضریب واکنش جداره ای (وابسته جنس لوله)، ضریب انتقال جرمی و شعاع لوله می باشد. ضریب انتقال جرمی (k_f) تابعی از نسبت ضریب پخشیدگی ذرات کلر ($D = 1.21\times10^{-5}\frac{cm^2}{s}$ for free Residual chlorine, Rossman(1994)) بر قطر لوله (d) و عدد بدون بعد

* Wall Decay

شروود* (Sh) بوده؛ که عدد شروود نیز برای جریان آرام ($R_e \leq 2000$) مطابق رابطه ی شماره ی (۳) محاسبه می گردد[19].

(۳)

$$Sh = 3.65 + \frac{0.0668(\frac{d}{L})S_c R_e}{1 + 0.04((\frac{d}{L})S_c R_e)^{\frac{2}{3}}}$$

$R_e \rightarrow$ Reynold's Number

$S_c \rightarrow$ Schmidt's Number

$S_c = \frac{\nu}{D}$

$D \rightarrow$ diffuvisity

$\nu \rightarrow$ kinematic viscosity

۳-۲. روش اجرای تحقیق

در این پژوهش شبیه سازی های کیفی – هیدرولیکی شبکه در محیط مدل EPANET (II) صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است که مدل EPANET (II) برای مدل سازی زوال توده ای کلر از روابط شماره ی (۱) تا (۳) استفاده می نماید. بررسی و مقایسه ی تغییرات غلظت کلر باقی مانده در حالت اول بین تمامی گره ها و در ساعت حداکثر مصرف و در حالت دوم در گره شماره ی (۲) به عنوان شاهد و در سری زمانی الگوی مصرف انجام گردید. بررسی ها نشان داد که در حالت اول گره شماره ی (۲۲) میزان تغییرات را بیشتر از سایر گره ها ایجاد می نماید؛ از این روی بحث و اختلاف غلظت کلر باقی مانده در جنس ها و سن های مختلف لوله های شبکه ی توزیع حول این گره صورت گرفت. همانطور که در بخش مواد و روش ها ذکر گردید؛ به منظور بررسی تاثیر جنس لوله های شبکه ی آبرسانی بر میزان زوال جداره ای کلر، دو نوع جنس از لوله های متداول (جنس های PVC† و چدنی) مورد ارزیابی قرار گرفتند. مشخصات ضرایب در نظر گرفته شده برای جنس های مذکور در جدول شماره ی (۱) خلاصه شده است[20]. شبیه سازی کیفی – هیدرولیکی این بخش از تحقیق بر روی لوله های نو (سن صفر) انجام گرفت.

جدول (۱) – ضرایب هیزن - ویلیامز و زوال جداره ای برای جنس های PVC و چدنی[۲۰]

جنس لوله	ضریب زوال دیواره ای ($m.d^{-1}$)	ضریب هیزن - ویلیامز	سن لوله
چدنی	۰/۱۵۲۴	۱۳۰	صفر
PVC	۰	۱۵۰	صفر

* Sherwood Number
† Polyvinyl chloride

در بررسی تاثیر سن بر زوال جداره ای کلر، فقط لوله های چدنی مورد ارزیابی قرار گرفتند و در این راستا سنین صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سال برای این لوله ها در نظر گرفته شد. جزئیات ضرایب مورد استفاده در این بخش از تحقیق در جدول شماره ی (۲) ارائه گردیده است[20]. دلیل عدم استفاده از لوله های PVC در ارزیابی سن لوله ها این است، که لوله های مذکور از جنس پلیمر های سنتزی بوده و به علت عدم وجود سطح فعال حضور اندکی در واکنش الکتروشیمیایی دارد. از این روی مقدار خوردگی و واکنش آن در طول زمان بسیار کند بوده و با تغییرات کمی همراه می باشد.

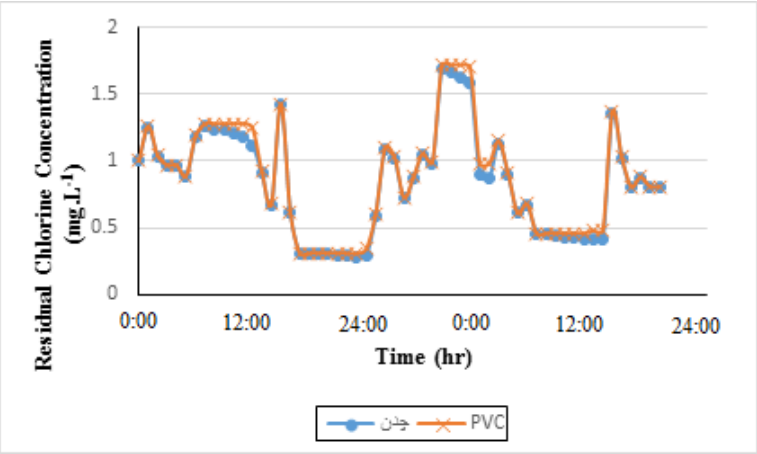
جدول (۲) – ضریب هیزن – ویلیامز و زوال دیواره ای لوله ی چدنی در سن های مختلف [۲۰]

سن لوله	ضریب زوال دیواره ای ($m.d^{-1}$)	ضریب هیزن - ویلیامز
۰	۰/۱۵۲۴	۱۳۰
۱۰	۰/۳۶۲۶	۱۱۰
۲۰	۰/۵۲	۹۵
۳۰	۰/۷۱۵	۸۲

۳. نتایج و بحث

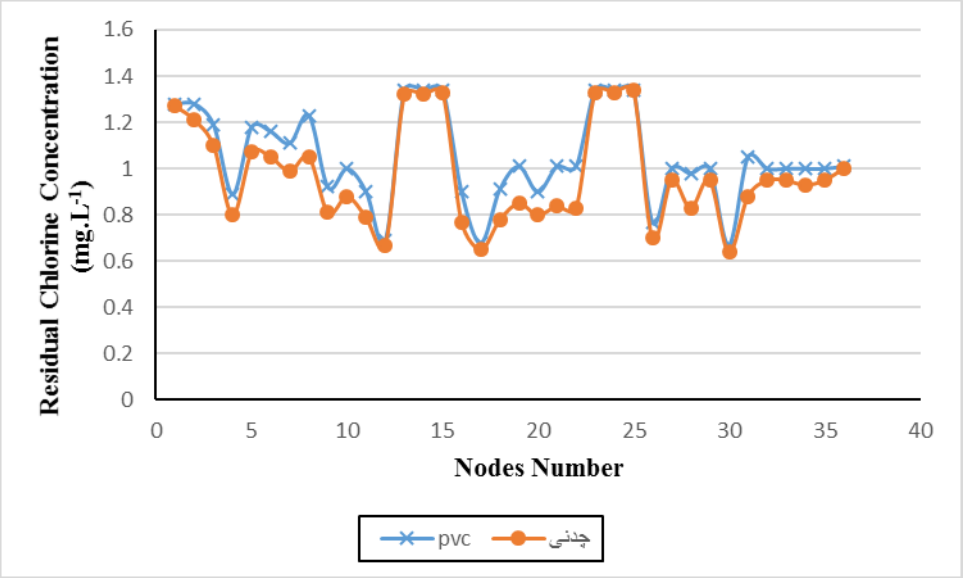
۳-۱. تاثیر جنس لوله

همانطور که در شکل شماره ی (۵) مشاهده می گردد؛ لوله های PVC نسبت به لوله های چدنی دارای نرخ زوال کمتری می باشند. بررسی های آماری نشان می دهد که در سری های زمانی الگوی مصرف، حداکثر اختلاف غلظت کلر باقی مانده بین جنس های چدن و PVC در گره شاهد (گره شماره ی (۲)) معادل ۱۴/۷٪ می باشد.



شکل (۵) – غلظت کلر باقی مانده در گره شاهد شبکه ی براشی پلینز با لوله هایی از جنس PVC و چدن

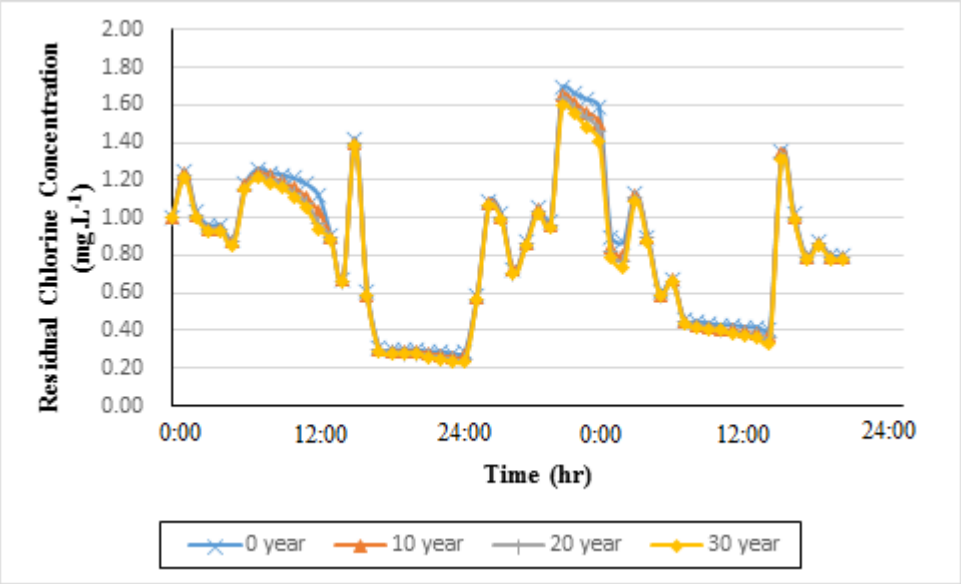
همانطور که پیشتر اشاره شد؛ در مقایسه ی اثر جنس لوله ها، حداکثر اختلاف کلر باقی مانده، از بین تمامی گره های شبکه ی براشی پلینز، در گره شماره ی (۲۲) اتفاق می افتد. این بخش از تحلیل ها در ساعت پیک مصرف شبکه ی براشی صورت پذیرفت که نتایج خروجی مدل در ارتباط با تغییرات مقدار کلر باقی مانده در شکل شماره ی (۶) قابل مشاهده می باشد. مقدار اختلاف کلر باقی مانده بین جنس های PVC و چدنی در ساعت پیک و در گره شماره ی (۲۲) معادل ۱۷/۸۲٪ برآورد گردید.



شکل (۶) – غلظت کلر باقی مانده در تمامی گره های شبکه ی براشی پلینز با لوله هایی از جنس PVC و چدن در ساعت پیک مصرف.

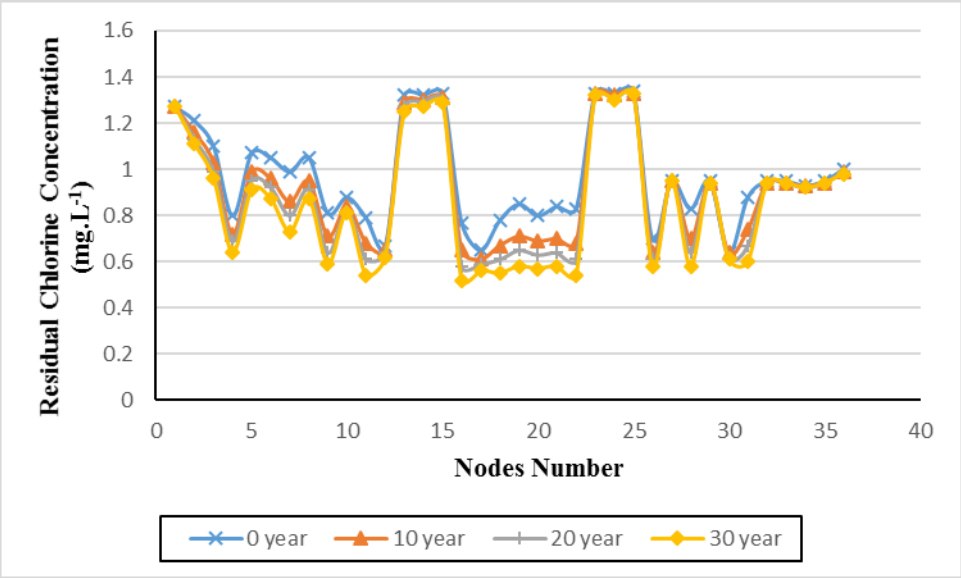
۲-۳. تاثیر سن لوله

در ارتباط با تاثیر سن لوله بر میزان نرخ زوال جداره ای کلر و نتیجتا" بر مقدار غلظت کلر باقی مانده، نتایج تحقیق برای سری های زمانی و گره های مختلف شبکه یبراشی پلینز به ترتیب در شکل های شماره ی (۷) و (۸) نمایش داده شده است. همانطور که در شکل شماره ی (۷) مشاهده می گردد؛ بررسی سری های زمانی الگوی مصرف شبکه ی براشی پلینز در گره شاهد نشان می دهد که حداکثر اختلاف غلظت کلر باقی مانده در بین جدید ترین و قدیمی ترین لوله ی چدنی ۱۹/۵٪ می باشد.



شکل (۷) – غلظت کلر باقی مانده در گره شاهد شبکه ی براشی پلینز با لوله های چدنی از سن های ۰، ۱۰،۲۰ و ۳۰ سال

همچنین بررسی اختلاف غلظت کلر باقی مانده در گره های مختلف (در ساعت پیک مصرف) دلالت بر آن داشت که حداکثر اختلاف غلظت (۳۴/۷۱٪) بین لوله ی جدید (سن صفر) و قدیمی ترین لوله (سن ۳۰ سال) در گره شماره ی (۲۲) اتفاق می افتد (شکل شماره ی (۸)).



شکل (۸) – غلظت کلر باقی مانده در تمامی گره های شبکه ی براشی پلینز با لوله های چدنی از سن های ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سال.

به طور کلی مقایسه ی میزان درصد های اختلاف در غلظت های کلر باقی مانده ناشی از سن و جنس لوله ها نشان می دهد که سن لوله نسبت به جنس آن تاثیر بیشتری را در زوال جداره ای کلر ایجاد می نماید. در نهایت نیز باید اشاره داشت که اثر سن و جنس لوله ها بر غلظت کلر باقی مانده در حالت اول (مقایسه ی تمامی گره ها در ساعت پیک مصرف) بهتر نمایش داده می شود. در حالت دوم (مقایسه در سری های زمانی) به دلیل استفاده از یک گره تغییرات غلظت کلر باقی مانده به صورت واضح نشان داده نمی شود. از این روی مقایسه غلظت کلر باقی مانده در تمامی گره ها و در زمان پیک مصرف، مبنای نتیجه گیری و ارزیابی قرار گرفت.

۴. نتیجه گیری

کلر باقی مانده در شبکه های آبرسانی منجر به ایجاد تضمین کیفیت میکروبی و تا حدودی شیمیایی آب می گردد. از این روی پیش بینی و بررسی عوامل موثر بر زوال کلر از اهمیت ویژه ای بر خوردار است. زوال توده ای کلر در درون ماتریکس آب صورت گرفته و تابعی از دما و مواد تشکیل دهنده ی درون آب می باشد. این درحالی است که زوال جداره ای تابعی از سن و جنس لوله می باشد. در گام نخست این تحقیق اثر جنس لوله های چدنی و PVC بر زوال جداره ای کلر ارزیابی شد. در این ارتباط نتایج نشان داد؛ که اختلاف غلظت کلر باقی مانده در بین جنس های مذکور به ۱۷/۸۲ ٪ می رسد. در گام دوم اثر سن لوله های چدنی مورد شبیه سازی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بخش نیز بیانگر حداکثر اختلاف ۳۴/۷۱٪ غلظت کلر باقی مانده در میان جدید ترین (صفر سال) و قدیمی ترین (۳۰ سال) سن لوله بود. در نهایت، نتیجه ی بررسی و مقایسه ی توامان اثرات سن و جنس لوله، اهمیت بیشتر تاثیر سن لوله در زوال جداره ای کلر را نسبت به جنس لوله بیان داشت.

.

۵. مراجع

1. Coulson J. M. And Richardson J. F. (1964) Chemical Engineering, 2nd Edn. Pergamon Press, Oxford, (3 Volumes).

2. A. Ostfeld and E. Salomons, “Optimal disinfection of water distribution networks following a contamination event,” in Proc. 16th Water Distribution Systems Analysis Conference (WDSA 2014), Bari, Italy: ELSEVIER, Volume 89, 2014, Pages 168–172.

3. U.S. EPA. _2006_. A water security handbook: Planning for and responding to drinking water contamination threats and incidents, U.S. EPA, Washington, D.C.

4. *Biswas*P, Lu C, Clark RM, A *model for chlorine concentration decay in pipes*. Wat *Res 1993*; *27*(*12*): *1715-1724*.

5. Hund-Der Yeh, Shi-Bin Wen, Ya-Chi Chang, Chung-Sying Lu, A new approximate solution for chlorine concentration decay in pipes, Water Research, Volume 42, Issues 10–11, May 2008, Pages 2787-2795.

6. G.R. Munavalli, M.S. Mohan Kumar, Water quality parameter estimation in a distribution system under dynamic state, Water Research, Volume 39, Issue 18, November 2005, Pages 4287-4298.

7. Wable O [et al.] Modeling chlorine concentrations in a network and applications to paris distribution network Proc,.Water Quality Modeling Distribution Systems, AWWA Research Foundation. - Denver, Colo : AWWA, 1991.

8. Hunt W. A and Kroon J. R Model Calibration Chlorine residuals in distribution systems Proc., Water Quality Modeling in Distribution Systems conf. - Denver, Colo :AWWA Research Foundation, 1991.

9. Clark R. M [et al.] Modeling Contaminant Propagation in Drinking Water Distribution Systems Journal of Environmental Engineering. - 1993. - 2 : Vol. 119. - pp. 349-364.

10. Rossman L.A, Clark R. M and Grayman W. M Modeling chlorine Residuals in Drinking Water Distribution Systems Journal of Environmental Engineering. - 1994. - 4 : Vol. 120. - pp. 803-820.

11. Cordoba, G. (2011), “ Using Of Artifical Neural Netwark for Evaluation and Prediction of some drinking water quality parameters within a water distribution System, ” International Journal Water Management and Water Structures., pp. 1-11.

12. Mugur, A. and Carmen, S. (2012), “chlorin Concentration decay in the water distribution systems, ”

13. WWW.EPA.gov, U.S. Environmental Protection Agency.

14. Kurek, W. and Ostfeld, A. (2013), “Multi-objective optimization of water quality, pumps operation, and storage sizing of water distribution systems Haifa ,” International Journal Environmental Management., **15**, pp 189- 197.

15. Hallam, N,B.; West, J.; Forster, C,; Powell, J.; & Spencer, I. "The Decay of Chlorine Associated With the Pipe Wall in Distribution Systems", Water Res.,2002.,36:14:34798.

16. Rosalam, HJ.; Krishnaiah S.D,"Free Chlorine Residual Content within the Drinking Water Distribution System" International Journal of Physical Sciences,2007,Vol. 2(8),pp.196-201.

17. Mutoti ,G.; Arevalo, J.; Taylor, J ,"Combined Chlorine Dissipation:Pipe Material,Water Quality,and Hydraulic Effects" Journal of AWWA, 2007, 99:10.

18. AL-Jasser, A.O, "Chlorine Decay in Drinking Water Transmission and Distribution Systems : Pipe Service Age Effect" Journal of Water Research ,2007,41,387-396.

19. Rossman L.A, Clark R. M and Grayman W. M Modeling chlorine Residuals in Drinking Water Distribution Systems Journal of Environmental Engineering. - 1994. - 4 : Vol. 120. - pp. 803-820.

20. Water Quality Division Disinfection System Survey Committee Report Journal of the American Water Works Association. - [s.l.] : American Water Works Association