

Studying the Effect of Factors Influencing the Change in Hazen-Williams Roughness Coefficient of Cast Iron Pipes during Operation Period

Mohammad Kazemi Soochelmaei¹ and Massoud Tabesh^{2*}

1- M.Sc. Student, Civil-Environmental Engineering, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Professor, Center of Excellence for Engineering and Management of Civil Infrastructures, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

* Corresponding Author, Email: mtabesh@ut.ac.ir

Received: 10/5/2018

Revised: 29/9/2018

Accepted: 29/9/2018

Abstract

Considering the importance of sufficient pressure in supplying demand in water distribution networks, it is necessary to study the factors affecting pressure variation, that the roughness of pipes directly affects the pressure of nodes. Therefore, the study of factors affecting the change in roughness coefficient (Hazen-Williams) in water distribution networks is important. Pipes diameter, age and corrosion are among factors affecting the change in the roughness coefficient of pipes that are evaluated in this paper. The roughness coefficients were plotted against each of the above mentioned factors, and the approximate relations of the roughness coefficient was obtained by fitting to the obtained graphs. Finally, by combining the relations obtained, a general relation is obtained for the roughness coefficient. Also, in this paper, the cast iron pipes, for which laboratory data is available, were used to obtain a mathematical relationship. Then again, instead of using the roughness coefficient of new pipes in analysis and design, the roughness coefficient for the end of the design period was used, taking into account the effective factors mentioned. To evaluate the results of the proposed method, a two-loop network was investigated in two common and real situations. The results showed that if the roughness coefficient of new pipes at the end of design period is used for designing, there will be a save of about 50% in cost of pipes, but then the network pressure at the end of design period will be reduced by more than 25%. Therefore, in order to ensure that there is sufficient pressure and demand satisfaction throughout the design period, it is necessary to accept an increase in the cost of network implementation at the beginning of the project.

Keywords: Consumption, Corrosion, Hazen-Williams roughness coefficient, Pipe age, Pipe diameter, Pressure.

بررسی تأثیر عوامل مؤثر بر تغییر ضریب زبری هیزن-ویلیامز لوله‌های چدنی در طول دوره بهره‌برداری

محمد کاظمی سوچلمایی^۱ و مسعود تابش^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استاد و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* نویسنده مسئول، ایمیل: mtabesh@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۲۰

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۷/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۰۷

چکیده

با توجه به اهمیت فشار کافی در تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان در شبکه‌های توزیع آب، بررسی عوامل مؤثر بر تغییر فشار ضرورت می‌یابد که زبری لوله‌ها به‌صورت مستقیم بر روی فشار گره‌ها تأثیرگذارند. بنابراین بررسی عوامل مؤثر بر تغییر ضریب زبری (ضریب هیزن-ویلیامز) در شبکه‌های آب اهمیت پیدا می‌کند. قطر لوله‌ها، عمر لوله‌ها و خوردگی آب از جمله عوامل مؤثر در تغییر ضریب زبری لوله‌ها هستند که در این مقاله مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. تغییرات ضریب زبری با هر کدام از عوامل مذکور رسم می‌شود و با برازش نمودارهای حاصله می‌توان روابط تقریبی ضریب زبری را به‌دست آورد. در نهایت با ترکیب روابط به‌دست آمده، یک رابطه کلی برای ضریب زبری حاصل می‌شود. همچنین در این مقاله از لوله‌های چدنی که داده‌های آزمایشگاهی آن در اختیار است، برای به‌دست آوردن رابطه ریاضی استفاده می‌شود. با وجود این، به جای استفاده از ضریب زبری لوله‌های نو در تحلیل و طراحی از ضریب زبری در انتهای دوره طرح با در نظر گرفتن عوامل مؤثر مذکور استفاده خواهد شد. برای ارزیابی نتایج روش ارائه‌شده، شبکه دوحلقه‌ای در دو حالت معمول و واقعی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد اگر برای طراحی از ضریب زبری لوله‌های نو استفاده شود، فشار شبکه در انتهای دوره طرح بیش از ۲۵ درصد کاهش می‌یابد ولی در هزینه لوله‌ها در ابتدای دوره طرح حدود ۵۰ درصد صرفه‌جویی می‌شود. بنابراین برای تضمین وجود فشار کافی و ارضای تقاضا در انتهای دوره طرح باید افزایش هزینه اجرای شبکه در ابتدای دوره طرح را پذیرفت.

کلمات کلیدی: ضریب زبری هیزن - ویلیامز، قطر لوله، عمر لوله، خوردگی آب، مصرف، فشار.

شبکه های توزیع آب شهری یکی از زیرساخت های پیچیده، ضروری و در عین حال پرهزینه در مدیریت شهری محسوب می شوند که برای تأمین مقدار تقاضای مورد نیاز مصرف کنندگان با فشار کافی و کیفیت مطلوب در شرایط مختلف در تمامی نقاط مصرف، طراحی و اجرا می شوند. به دلیل افزایش نیاز آبی، این هدف، دغدغه مدیران و بهره برداران شده است. با این وجود مهم ترین خصوصیتی در شبکه ها که در تماس مستقیم با مصرف کننده است، فشار آبی است که در محل مصرف وجود دارد. بنابراین بررسی عواملی که باعث تغییر در فشار آب می شوند، دارای اهمیت ویژه ای است. زبری لوله ها به صورت مستقیم روی فشار گره های متصل به لوله ها تأثیر گذارند، بنابراین زبری لوله ها به تبع ارتباط مستقیم مصرف کننده با فشار گرهی، به طور مستقیم با مصرف کننده در ارتباط بوده و باید مورد توجه بیشتری قرار گیرند. با این وجود برای تأثیر زبری لوله ها بر فشار و در واقع بر افت فشار لوله ها از طریق روابط مختلف، زبری را با ضرایب مختلف نمایش می دهند.

$$V = 0.849 C_{HW} R_H^{0.63} S^{0.54} \quad (1)$$

که C_{HW} : ضریب هیزن-ویلیامز (بدون بعد)، R_H : شعاع هیدرولیکی لوله، S : شیب طولی لوله و V : سرعت آب در لوله هستند. این فرمول در ابتدا برای شیب ۰/۰۰۱ و شعاع هی درولیکی ۰/۳ متر به دست آمد. بنابراین ضریب هیزن-ویلیامز به مقادیر R_H و S و نیز شرایط جریان بستگی دارد. با توجه به اینکه مهندسان طراح از این فرمول برای محدوده وسیعی از قطر و شیب خط انرژی استفاده می کنند، Jain et al. (1978) پس از مقایسه این فرمول با فرمول استدلالی دارسی-وایسباخ، فرمول هیزن-ویلیامز را به صورت رابطه (۲) اصلاح کردند.

$$V = 143.5 C_R R_H^{0.6575} S^{0.5525} \quad (2)$$

$$C_R = \frac{-2(2)^{0.5}}{3.83 \text{Re}^{0.105}} \log\left(\frac{e}{3.7D} + \frac{1.78}{\text{Re}}\right)$$

این رابطه با فرض دمای ۲۰ درجه سلسیوس آب و لزجت سینماتیکی $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ به دست آمده است. همچنین در این رابطه C_R : ضریب هیزن-ویلیامز اصلاح شده، Re : عدد رینولدز، e : زبری معادل لوله و D : قطر لوله هستند.

Travis and Mays (2007) در تحقیق خود با اشاره به استفاده گسترده تر از ضریب زبری هیزن-ویلیامز به جای ضریب زبری کلبروک-وایت در معادله دارسی-وایسباخ، دلیل آن را گستردگی پایگاه داده های ضریب هیزن-ویلیامز (C_{HW}) در مقایسه با پایگاه داده های نسبتاً کوچک زبری ماسه معادل (K_s) دانستند که این ضریب در معادله دارسی-وایسباخ مورد نیاز است. آن ها در این تحقیق برای تخمین دقیق تر ضریب هیزن-ویلیامز، رابطه ای بین معادلات افت هد هیزن-ویلیامز و دارسی-وایسباخ مطرح کردند. در این رابطه برای تعیین C_{HW} لازم است که عدد رینولدز و قطر لوله به طور هم زمان معلوم باشند. بنابراین با ارائه یک راه حل ضمنی و ارتباط بین ضریب اصطکاک معادل هیزن-ویلیامز (f_h) و ضریب اصطکاک معادل کلبروک-وایت (f_k)، مطابق روابط (۳) و (۴) مقدار C_{HW} به

با توجه به استفاده بیشتر از رابطه هیزن-ویلیامز در طراحی های مهندسی، ضریب هیزن-ویلیامز (C_{HW}) بیشتر مورد توجه مهندسان قرار گرفته است. همچنین در طراحی شبکه های توزیع آب به خصوص در نرم افزارها از این ضریب به عنوان مشخصه اصلی لوله ها استفاده می شود. بنابراین تغییر در این ضریب می تواند باعث تغییر در طراحی شبکه و به تبع، تغییر در مصارف و فشار گره ها شود، یعنی در نتایج شبیه سازی شبکه تغییر ایجاد می شود. بدین جهت در کالیبراسیون شبکه، برای نزدیک کردن محاسبات به مشاهدات از تنظیم و اصلاح ضریب زبری هیزن-ویلیامز در لوله ها استفاده می شود. در این مقاله عوامل مؤثر در ضریب زبری لوله ها و تخمین دقیق تر ضریب هیزن-ویلیامز بررسی می شود تا بتوان تغییر ضریب زبری را در طول طراحی و بهره برداری شبکه تشخیص داد و با اعمال این تغییر، اهداف طراحی را بهتر برآورده کرد.

با توجه به استفاده بیشتر از رابطه هیزن-ویلیامز در طراحی های مهندسی، ضریب هیزن-ویلیامز (C_{HW}) بیشتر مورد توجه مهندسان قرار گرفته است. همچنین در طراحی شبکه های توزیع آب به خصوص در نرم افزارها از این ضریب به عنوان مشخصه اصلی لوله ها استفاده می شود. بنابراین تغییر در این ضریب می تواند باعث تغییر در طراحی شبکه و به تبع، تغییر در مصارف و فشار گره ها شود، یعنی در نتایج شبیه سازی شبکه تغییر ایجاد می شود. بدین جهت در کالیبراسیون شبکه، برای نزدیک کردن محاسبات به مشاهدات از تنظیم و اصلاح ضریب زبری هیزن-ویلیامز در لوله ها استفاده می شود. در این مقاله عوامل مؤثر در ضریب زبری لوله ها و تخمین دقیق تر ضریب هیزن-ویلیامز بررسی می شود تا بتوان تغییر ضریب زبری را در طول طراحی و بهره برداری شبکه تشخیص داد و با اعمال این تغییر، اهداف طراحی را بهتر برآورده کرد.

صورت تقریبی با درصد خطای ۴٪ تخمین زده می‌شود.

$$\frac{1}{\sqrt{f_k}} = \frac{2}{\ln(10)} \ln\left(\frac{k_s}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f_k}}\right) \quad (3)$$

$$f_c = 1016.61 \times C_{HW}^{-1.85} \times D^{-0.0185} \times \text{Re}^{-0.148} \quad (4)$$

که f_k : ضریب اصطکاک معادل کلبروک-وایت، f_c : ضریب اصطکاک معادل هیزن-ویلیامز، C_{HW} : ضریب هیزن-ویلیامز، K_s : زبری ماسه معادل، Re : عدد رینولدز و D : قطر لوله مورد آزمایش است. در صورتی که یک لوله با قطر مشخص D_i تحت جریانی با عدد رینولدز متناظر R_i مورد آزمایش قرار گیرد، با برابر قرار دادن دو رابطه (۳) و (۴)، مقدار C_{HW} با فرض‌های مختلف قابل تعیین است.

محققان بیشتری در این زمینه با مقایسه معادلات هیزن-ویلیامز و دارسی-وایسباخ، روابط تخمینی دیگری را ارائه دادند. از جمله این افراد می‌توان به (Locher 2000) اشاره نمود که رابطه (۵) را برای ضریب دارسی-وایسباخ ارائه نموده است.

$$f = \frac{0.201(100 / C_{HW})^{1.85}}{\text{Re}^{0.148} D^{0.0185}} \quad (5)$$

در آزمایشات و تحقیقات زیادی که روی ضریب هیزن-ویلیامز انجام شد، ارتباط قوی بین این ضریب با قطر لوله تا حدودی به اثبات رسیده است. (Valiantzas 2005) در تحقیق خود با در نظر گرفتن این ارتباط، روابط اصلاحی را برای ضریب هیزن-ویلیامز خود ارائه کرد. همچنین او با مقایسه دو معادله هیزن-ویلیامز (HW) و دارسی-وایسباخ (DW-CW)، در محدوده سرعت بین ۰/۳ و ۳ متر بر ثانیه، قطر بین ۳۰ و ۹۰۰ میلی‌متر و زبری معادل بین ۰/۰۰۰۱ و ۱/۶ میلی‌متر روابطی را برای ضریب هیزن-ویلیامز اصلاح شده که تابعی از قطر لوله است، ارائه داد. با مقادیر معمول زبری معادل و ضریب هیزن-ویلیامز یعنی $\varepsilon = 0.1 \text{ mm}$ ، $C_{HW} = 135$ رابطه (۶) ارائه شد.

$$C_D = C_{\max} + 13 \log\left(\frac{D}{D_0}\right) ; \text{if } D < D_0 \quad (D_0 = 300 \text{ mm})$$

$$C_D = C_{\max} ; \text{if } D \geq D_0 \quad (C_{\max} = 135) \quad (6)$$

همچنین در حالت کلی، زمانی که تمامی متغیرها تغییر کنند، رابطه (۷) ارائه شد.

$$C_D = C_{\max} + 13 \left(\frac{C_{\max}}{135}\right)^{1.5} \log\left(\frac{C_{\max} D}{135 D_0}\right) ; \text{if } D < D_0 \quad \frac{135}{C_{\max}}$$

$$C_D = C_{\max} ; \text{if } D \geq D_0 \quad \frac{135}{C_{\max}} \quad (7)$$

$$C_{\max} = 103 + 52.4 \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)\right] ; (\varepsilon_0 = 0.284 \text{ mm})$$

که C_D : ضریب هیزن-ویلیامز اصلاح شده، C_{\max} : ضریب هیزن-ویلیامز معمول، D : قطر لوله، D_0 : قطر معمول لوله‌ها، ε : زبری معادل لوله و ε_0 : زبری معادل معمول لوله‌ها هستند.

(Moghazi 1998) در آزمایش‌های خود روی لوله‌های کوچک پلی اتیلن (PE) که در آبیاری و کشاورزی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند، ضریب هیزن-ویلیامز را تخمین زد. همچنین اشاره کرد که ضریب هیزن-ویلیامز بدون در نظر گرفتن قطر آن‌ها معمولاً برای لوله‌های پلی اتیلن بین ۱۳۰ تا ۱۴۰ فرض می‌شود. در این آزمایش‌ها در قطرهای مختلف، میزان افت هد را برای دبی‌های مختلف جریان اندازه‌گیری نمود. سپس با افت هد‌های محاسباتی با ضرایب هیزن-ویلیامز مختلف، مقایسه نموداری صورت گرفته و بهترین ضریب انتخاب شد. براساس نتیجه این آزمایش‌ها، ضریب هیزن-ویلیامز برای قطرهای ۱۳، ۱۶، ۱۹ و ۲۲ میلی‌متر، به ترتیب ۱۲۹، ۱۳۶، ۱۴۴ و ۱۴۸ به دست آمد.

(Yildirim and Ozger 2008) برای محاسبه افت هد ناشی از زبری لوله‌های پلی اتیلن به کار گرفته شده در کاربرد آبیاری و کشاورزی، از رابطه تجربی هیزن-ویلیامز به دلیل سادگی کار با آن استفاده کردند. آن‌ها با توجه به در دسترس نبودن داده‌های کافی، واضح و مشخص، از روش سیستم‌های فازی استفاده کردند. در این تحقیق با استفاده از روش نوروفازی، نرخ جریان و قطر لوله‌ها به عنوان متغیرهای ورودی و افت هد اصطکاکی و ضریب هیزن-ویلیامز به عنوان متغیرهای خروجی به هم مرتبط شدند. همچنین از لوله‌های با قطر ۱۳، ۱۶، ۱۹ و ۲۲ میلی‌متر استفاده شد و بهترین ضرایب برای آن‌ها تخمین زده شد.

(Dini and Tabesh 2014) با توجه به تغییر ضریب زبری در شبکه‌های توزیع آب شهری، کالیبراسیون هم‌زمان ضرایب الگوی تقاضا و هیزن-ویلیامز را انجام دادند. ضرایب هیزن-ویلیامز با توجه به تأثیری که در افت فشار و به تبع، روی فشار گرهی دارند، موجب تغییر مصارف گرهی می‌شوند. در

این تحقیق از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان (ACO) و شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET2.0 استفاده شده و ضرایب تقاضا و هیزن-ویلیامز به عنوان پارامترهای کالیبراسیون و جریان لوله‌ها و فشار گرهی به عنوان داده‌های اندازه‌گیری در نظر گرفته شدند. تابع هدف در این مدل نیز کاهش تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در نظر گرفته شد. در نهایت نتایج نشان می‌دهد که مدل کالیبراسیون جدید می‌تواند ضرایب تقاضا و هیزن-ویلیامز را با دقت بالا کالیبره کند.

همچنین (Sherri et al. (2017) با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبیه‌ساز WaterGEMS به کالیبراسیون هم‌زمان تقاضای گرهی و ضریب هیزن-ویلیامز پرداختند. در این تحقیق لوله‌ها و گره‌ها بر حسب مشخصه‌های فیزیکی مثل سن لوله‌ها، جنس لوله‌ها و وضعیت جغرافیایی شبکه توزیع آب دسته‌بندی شده‌اند که این طبقه‌بندی باعث کوچک شدن فضای جواب و آسان‌تر پیدا کردن جواب نهایی در زمان کمتری شده است.

Lamont (1969, 1981) برای لوله‌های معمولی و سرعت جریان ۰/۹ متر بر ثانیه، مقادیر ضریب هیزن-ویلیامز را پس از بررسی ۳۷۲ آزمون، مطابق جدول ۱ توصیه نمود. سپس با اعمال ضرایبی مقادیر ضریب در سرعت‌های غیر از ۰/۹ متر بر ثانیه تصحیح شد.

از طرفی با توجه به این‌که با گذشت زمان، زبری داخلی لوله‌ها افزایش می‌یابد، بنابراین ظرفیت هیدرولیکی لوله‌ها کاهش می‌یابد. در این راستا (Lamont (1969, 1981 اثر عمر لوله‌ها را روی ضریب هیزن-ویلیامز ۶۰ لوله چدنی پوشش‌دار بررسی نمود که نتایج آن مطابق جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به تحقیقات و آزمایش‌هایی که تا به این‌جا انجام شد، مشاهدات مختلف محققان گویای این مطلب است که تخمین صحیح مقدار ضریب زبری برای لوله‌های کهنه، کار بسیار دشواری است و نتایج دقیق‌تر با مشاهدات و آزمایشات بیشتر امکان‌پذیر است.

همچنین (Lamont (1981 با آزمایشی که روی ۶۰ لوله کهنه چدنی پوشش‌دار انجام داد، برای این‌که این تغییر ملموس‌تر باشد، رابطه‌ای بین آهنگ رشد سالانه زبری (α) و شاخص اشباع لانتزلی را که خود وابسته به pH قلیاییت و میزان کلسیم آب است، پیشنهاد نمود. در همین راستا Colebrook and White (1937) برای رشد سالانه زبری لوله‌های چدنی فرمولی را مطابق رابطه (۸) بر حسب pH آب پیشنهاد نمودند.

$$2 \log \alpha = 6.61 - pH \quad (8)$$

که α : آهنگ رشد سالانه زبری (بدون بعد) است و برای pH های مختلف، ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر ضریب هیزن-ویلیامز برای لوله‌های نو با قطرهای مختلف در سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه

جنس لوله	قطر لوله‌های نو (میلی‌متر)				
	۷۵	۱۵۰	۳۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰
چدن بدون پوشش	۱۲۱	۱۲۵	۱۳۰	۱۳۲	۱۳۴
چدن با پوشش	۱۲۹	۱۳۳	۱۳۸	۱۴۰	۱۴۱
فولاد بدون پوشش	۱۴۲	۱۴۵	۱۴۷	۱۵۰	۱۵۰
فولاد با پوشش	۱۳۷	۱۴۲	۱۴۵	۱۴۸	۱۴۸
آهن نرم	۱۳۷	۱۴۲	-	-	-
آهن گالوانیزه	۱۲۹	۱۳۳	-	-	-
آهن ریخته‌گری با پوشش	۱۳۷	۱۴۲	۱۴۷	۱۴۸	۱۴۸
آزبست-سیمان بدون پوشش	۱۴۲	۱۴۵	۱۴۷	۱۵۰	-
آزبست-سیمان با پوشش	۱۴۷	۱۴۹	۱۵۰	۱۵۲	-
بتن	۱۲۹-۶۹	۱۳۳-۷۹	۱۳۸-۸۴	۱۴۰-۹۰	۱۴۱-۹۵
بتن پیش تنیده	-	-	۱۴۷	۱۵۰	۱۵۰
پی وی سی، برنج، سرب، مس	۱۴۷	۱۴۹	۱۵۰	۱۵۲	۱۵۳
لوله‌های تمیز شده توسط ساییدن	۱۰۹	۱۱۶	۱۲۱	۱۲۵	۱۲۷

جدول ۲- اثر عمر و خورندگی روی ضریب هیزن-ویلیامز
لوله‌های چدنی پوشش‌دار

درجه خورندگی آب	قطر لوله‌ها (میلی‌متر)				
	۱۲۰۰	۶۰۰	۳۰۰	۱۵۰	۷۵
۳۰ سال عمر					
جزیی	۱۲۰	۱۱۷	۱۱۲	۱۰۶	۱۰۰
متوسط	۱۰۷	۱۰۲	۹۷	۹۰	۸۳
قابل ملاحظه	۸۹	۸۳	۷۸	۷۰	۵۹
زیاد	۷۳	۶۶	۵۸	۵۰	۴۱
۶۰ سال عمر					
جزیی	۱۱۲	۱۰۷	۱۰۲	۹۷	۹۰
متوسط	۹۶	۹۲	۸۵	۷۹	۶۹
قابل ملاحظه	۷۸	۷۲	۶۶	۵۸	۴۹
زیاد	۶۲	۵۶	۴۸	۳۹	۳۰
۱۰۰ سال عمر					
جزیی	۱۰۴	۱۰۰	۹۵	۸۹	۸۱
متوسط	۸۹	۸۳	۷۸	۷۰	۶۱
قابل ملاحظه	۷۱	۶۴	۵۷	۴۹	۴۰
زیاد	۵۴	۴۸	۳۹	۳۰	۲۱

و همچنین درجه خورندگی آب، ضریب زبری هیزن-ویلیامز تغییر می‌کند. بنابراین در حالات مختلف، تغییرات مربوط به ضریب هیزن-ویلیامز تحلیل و بررسی می‌شود.

۳-۱- بررسی تغییر قطر لوله

(Lamont 1981) برای قطرهای مختلف لوله‌های چدنی، آزمایش‌هایی را با شرایط درجه خورندگی جزئی آب انجام داد و برای این که این تغییرات در زمان‌های مختلف نیز اثبات شود، برای عمرهای مختلف لوله‌ها هم این آزمایش‌ها را تکرار کرد. در جدول ۴ تغییرات ضریب زبری با افزایش قطر لوله‌ها در عمرهای مختلف ارائه شده و شکل ۱ روند این تغییرات را به خوبی نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۴ و شکل ۱، نتایج زیر حاصل می‌شود:
۱. با افزایش قطر لوله‌ها، ضریب هیزن-ویلیامز افزایش و به تبع آن، زبری لوله‌ها کاهش می‌یابد.

۲. با توجه به روند مشابه افزایش ضریب زبری با قطر در تمامی زمان‌ها، می‌توان گفت که قطرهای فارغ از دیگر عوامل، مستقلاً روی زبری لوله‌ها تأثیر خواهند داشت.

۳. با افزایش قطر، شیب افزایش ضریب زبری کاهش می‌یابد و این یعنی در قطرهای خیلی بالا، قطر عامل تأثیرگذاری نخواهد بود و با هر چه بزرگتر شدن قطر لوله‌ها، تأثیر قطر روی زبری لوله‌ها کاهش می‌یابد.

۴. برای کمی‌سازی تأثیر قطر لوله‌ها روی ضریب زبری، با توجه به روند ثابت تغییر ضریب با قطر در تمام زمان‌ها و البته تغییر نامنظم آن‌ها می‌توان گفت در تمام زمان‌ها، بعد از قطر ۶۰۰ میلی‌متر، ضریب زبری را می‌توان همان مقدار ثابت برای لوله در هر زمان فرض کرد.

۳-۲- بررسی عمر لوله

(Lamont 1981) برای سن‌های مختلف لوله‌های چدنی، آزمایش‌هایی را با شرایط درجه خورندگی جزئی آب انجام داد و برای این که این تغییرات در قطرهای مختلف نیز اثبات شود، برای قطرهای مختلف لوله‌ها هم این آزمایش‌ها را تکرار کرد. جدول ۵ تغییرات ضریب زبری را با افزایش سن لوله‌ها در قطرهای مختلف و شکل ۲ روند این تغییرات را به خوبی نشان می‌دهد.

(Lamont 1981) نیز برای درجات خورندگی مختلف، مقادیر متوسط رشد سالانه زبری را ارائه کرد. بنابراین درجات خورندگی به راحتی به مقادیر مشخصی از pH آب کمی می‌شوند که جدول ۳ این اعداد را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به مطالعات و آزمایشاتی که در این راستا صورت گرفته است، عوامل اصلی مؤثر در ضریب زبری شامل عمر لوله، قطر لوله، خورندگی و pH آب می‌شوند.

۳- تحلیل روابط و عوامل مؤثر بر ضریب زبری

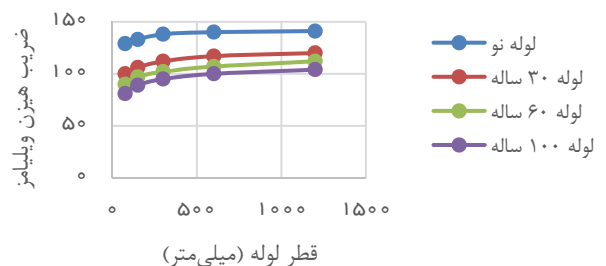
با توجه به اعدادی که (Lamont 1981) بعد از آزمایشات متعدد ارائه داد، می‌توان تحلیل نمود که با تغییر قطر و عمر لوله‌ها

جدول ۳- رابطه بین درجه خورندگی آب و pH

pH	رشد سالانه زبری	درجه خورندگی
۹٫۸	۰٫۰۲۵	جزیی
۸٫۸	۰٫۰۷۶	متوسط
۷٫۸	۰٫۲۵	قابل ملاحظه
۶٫۸	۰٫۷۶	زیاد

جدول ۴- تغییر ضریب زبری با تغییر قطر لوله‌ها در شرایط خوردگی جزیی

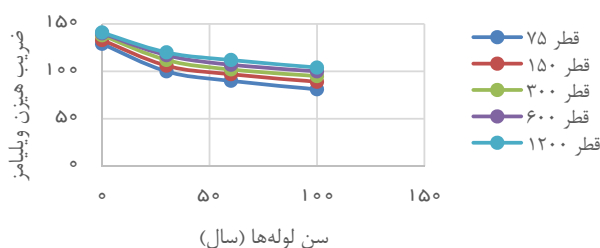
قطر (mm)	سن (سال)			
	نو	۳۰	۶۰	۱۰۰
۷۵	۱۲۹	۱۰۰	۹۰	۸۱
۱۵۰	۱۳۳	۱۰۶	۹۷	۸۹
۳۰۰	۱۳۸	۱۱۲	۱۰۲	۹۵
۶۰۰	۱۴۰	۱۱۷	۱۰۷	۱۰۰
۱۲۰۰	۱۴۱	۱۲۰	۱۱۲	۱۰۴



شکل ۱- تأثیر قطر لوله‌ها روی ضریب زبری

جدول ۵- تغییر ضریب زبری با تغییر سن لوله‌ها در شرایط خوردگی جزیی

سن (سال)	قطر (میلی‌متر)				
	۷۵	۱۵۰	۳۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰
۰	۱۲۹	۱۳۳	۱۳۸	۱۴۰	۱۴۱
۳۰	۱۰۰	۱۰۶	۱۱۲	۱۱۷	۱۲۰
۶۰	۹۰	۹۷	۱۰۲	۱۰۷	۱۱۲
۱۰۰	۸۱	۸۹	۹۵	۱۰۰	۱۰۴



شکل ۲- تأثیر سن لوله‌ها روی ضریب زبری

۳-۳- بررسی خوردگی آب

با توجه به این‌که مقادیر قبلی در درجه خوردگی جزیی تحلیل شده بودند، ضروری است که مشخص شود، ضریب زبری یک لوله در یک قطر و سن مشخص با خوردگی آب چگونه تغییر می‌کند. از طرفی با توجه به درجه‌بندی کیفی خوردگی آب به صورت جزیی، متوسط، قابل‌ملاحظه و زیاد، مطابق جدول ۳، درجات خوردگی به وسیله pH معادل‌سازی کمی شده است.

(Lamont 1981) مقادیر ضریب زبری را برای درجات خوردگی مختلف آب بررسی نمود و برای این‌که این تغییرات در زمان‌های مختلف نیز اثبات شود، برای سن‌های مختلف لوله‌ها هم این آزمایش‌ها را انجام داد. در نهایت برای این‌که بتوان رابطه‌ای کمی برای تأثیر خوردگی آب روی ضریب زبری به دست آورد، برای یک لوله با قطر مشخص مثل قطر ۱۵۰ میلی‌متری تحلیل صورت می‌گیرد. جدول ۶ مقادیر ضریب زبری را برای درجات خوردگی و سن‌های مختلف و شکل ۳ روند این تغییرات را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۶ و شکل ۳، نتایج زیر حاصل می‌شود:
۱. با افزایش خوردگی آب (کاهش pH معادل)، ضریب هیزن-

با توجه به جدول ۵ و شکل ۲، نتایج زیر حاصل می‌شود:
۱. با افزایش سن لوله‌ها، ضریب هیزن-ویلیامز کاهش و به تبع آن، زبری لوله‌ها افزایش می‌یابد.
۲. با توجه به روند مشابه کاهش ضریب زبری با قطر در تمامی زمان‌ها، می‌توان گفت که سن لوله‌ها فارغ از دیگر عوامل، مستقلاً روی زبری لوله‌ها تأثیر خواهند داشت.
۳. با افزایش سن، شیب افزایش ضریب زبری کاهش می‌یابد و این یعنی در سن‌های بالا، سن لوله تأثیرگذاری کمتری خواهد داشت.

۴. برای کمی‌سازی تأثیر سن لوله‌ها روی ضریب زبری، با توجه به روند ثابت تغییر ضریب با قطر در تمام زمان‌ها، می‌توان رابطه درجه دوم را برای این تأثیر اختصاص داد. رابطه (۹) با توجه به برازش نمودار تمام قطر‌ها در طول عمر آن‌ها با ضریب همبستگی ۰/۹ به دست آمده است.

$$C_{HW(t)} = 0.005 \times t^2 - 0.9 \times t + C_{HW(0)} \quad (9)$$

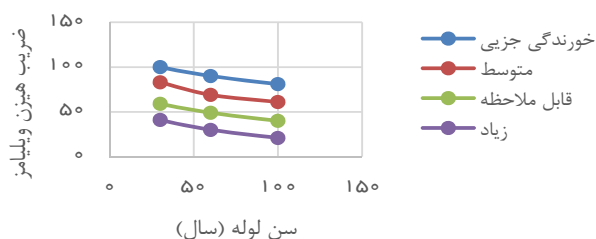
که $C_{HW(t)}$: مقدار ضریب هیزن-ویلیامز در عمر t (سال) از لوله و $C_{HW(0)}$: مقدار ضریب هیزن-ویلیامز در ابتدای عمر لوله در درجه خوردگی جزیی آب است.

۳-۴- بررسی توأمان تغییر قطر، عمر و خوردگی

با توجه به این که مقادیر ضریب زبری برای قطر و سن‌های مختلف لوله‌ها و همچنین درجات خوردگی متفاوت آب، تغییرات قابل توجهی داشته است، بنابراین با در نظر گرفتن هر سه عامل در کنار هم، می‌توان تحلیل دقیق‌تری نسبت به تغییرات ضریب زبری داشت. جداول ۷ تا ۱۱ تغییرات ضریب زبری را با سه عامل مذکور نشان می‌دهد و شکل‌های ۴ تا ۸ نیز روند این تغییرات را نمایش می‌دهد.

جدول ۷- تغییر ضریب زبری با تغییر سن لوله و درجه خوردگی آب در قطر ۷۵ میلی‌متری

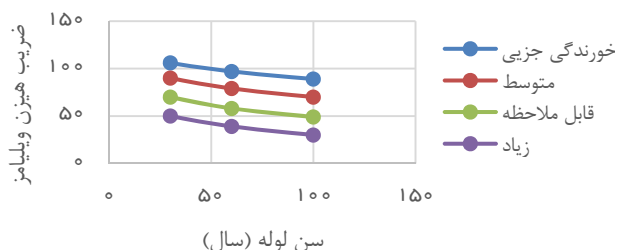
سن (سال)	خوردگی			
	جزیی	متوسط	قابل ملاحظه	زیاد
۳۰	۱۰۰	۸۳	۵۹	۴۱
۶۰	۹۰	۶۹	۴۹	۳۰
۱۰۰	۸۱	۶۱	۴۰	۲۱



شکل ۴- تأثیر سن لوله و خوردگی آب در قطر ۷۵ میلی‌متری روی ضریب زبری

جدول ۸- تغییر ضریب زبری با تغییر سن لوله و درجه خوردگی آب در قطر ۱۵۰ میلی‌متری

سن (سال)	خوردگی			
	جزیی	متوسط	قابل ملاحظه	زیاد
۳۰	۱۰۶	۹۰	۷۰	۵۰
۶۰	۹۷	۷۹	۵۸	۳۹
۱۰۰	۸۹	۷۰	۴۹	۳۰



شکل ۵- تأثیر سن لوله و خوردگی آب در قطر ۱۵۰ میلی‌متری روی ضریب زبری

ویلیامز کاهش و به تبع آن، زبری لوله‌ها افزایش می‌یابد.

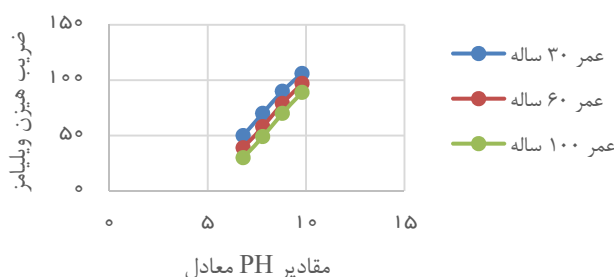
۲. با توجه به روند مشابه کاهش ضریب زبری با خوردگی در تمامی زمان‌ها، می‌توان گفت که خوردگی آب فارغ از دیگر عوامل، مستقلاً روی زبری لوله‌ها تأثیر خواهند داشت.

۳. با افزایش خوردگی، ضریب زبری نیز به صورت ثابت کاهش می‌یابد و این به منزله رابطه خطی بین خوردگی آب و ضریب زبری خواهد بود.

۴. برای کمی‌سازی تأثیر خوردگی آب روی ضریب زبری، با توجه به روند ثابت تغییر ضریب با خوردگی در تمام زمان‌ها، می‌توان رابطه درجه اول را برای این تأثیر اختصاص داد. رابطه (۱۰) با توجه به برازش نمودار تمام عمرها در طول خوردگی‌های مختلف آب با ضریب همبستگی ۰/۹۹ به دست آمده است.

جدول ۶- تغییر ضریب زبری با تغییر درجه خوردگی آب در قطر ۱۵۰ میلی‌متری

سن (سال)			pH
۱۰۰	۶۰	۳۰	
۸۹	۹۷	۱۰۶	۹/۸
۷۰	۷۹	۹۰	۸/۸
۴۹	۵۸	۷۰	۷/۸
۳۰	۳۹	۵۰	۶/۸



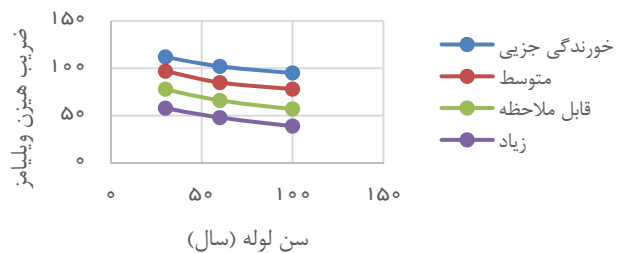
شکل ۳- تأثیر خوردگی آب روی ضریب زبری

$$C_{HW(t,pH)} = 19.5 \times pH + C_{HW(t)} - 190 \quad (10)$$

که $C_{HW(t)}$: ضریب هیزن ویلیامز در سن t در درجه خوردگی جزئی، $C_{HW(t,pH)}$: ضریب هیزن ویلیامز در سن t در درجه خوردگی مدنظر و pH : مقدار معادل درجه خوردگی مدنظر خواهد بود.

جدول ۹- تغییر ضریب زبری با تغییر سن لوله و درجه خوردندگی آب در قطر ۳۰۰ میلی متری

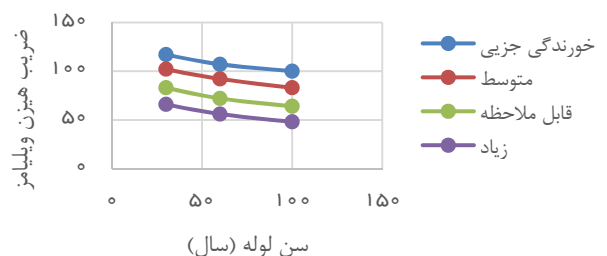
سن (سال)	خوردندگی			
	جزیی	متوسط	قابل ملاحظه	زیاد
۳۰	۱۱۲	۹۷	۷۸	۵۸
۶۰	۱۰۲	۸۵	۶۶	۴۸
۱۰۰	۹۵	۷۸	۵۷	۳۹



شکل ۶- تأثیر سن لوله و خوردندگی آب در قطر ۳۰۰ میلی متری روی ضریب زبری

جدول ۱۰- تغییر ضریب زبری با تغییر سن لوله و درجه خوردندگی آب در قطر ۶۰۰ میلی متری

سن (سال)	خوردندگی			
	جزیی	متوسط	قابل ملاحظه	زیاد
۳۰	۱۱۷	۱۰۲	۸۳	۶۶
۶۰	۱۰۷	۹۲	۷۲	۵۶
۱۰۰	۱۰۰	۸۳	۶۴	۴۸



شکل ۷- تأثیر سن لوله و خوردندگی آب در قطر ۶۰۰ میلی متری روی ضریب زبری

با توجه به جداول ۷ تا ۱۱ و شکل های ۴ تا ۸، نتایج زیر حاصل می شود:

- وقتی در یک قطر مشخص بررسی صورت می گیرد، مشاهده می شود که با افزایش سن، ضریب زبری کاهش می یابد. با توجه به تأثیر خوردندگی در این مورد، با افزایش درجه خوردندگی آب

نیز ضریب زبری کاهش می یابد.

- وقتی در یک قطر مشخص بررسی صورت می گیرد، با افزایش درجه خوردندگی، کاهش ضریب زبری به طور یکنواخت رخ می دهد. یعنی در نمودار، با افزایش خوردندگی آب، فاصله بین نمودارها با هم برابر است. این نوع تغییر یعنی خوردندگی و ضریب زبری به صورت خطی با هم تغییر می کنند.

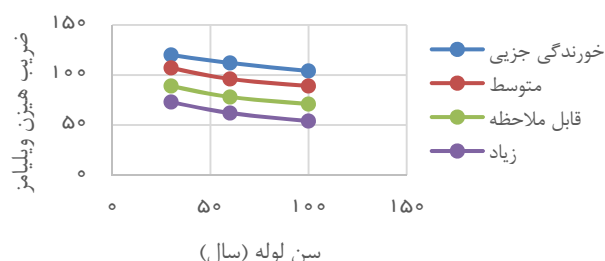
- وقتی همه نمودارها با هم مقایسه می شوند، مشاهده می شود که شکل نمودارها کاملاً یکسان هستند و تنها فرق این نمودارها، مقادیر ضرایب آن ها است که به دلیل تغییر قطر لوله ها، این اتفاق افتاده است. این تشابه به این دلیل است که رابطه بین سن و خوردندگی در تمام قطرها با هم یکسان است. - در نهایت این گونه تحلیل می شود که این سه عامل به صورت مستقل روی ضریب زبری با روابط خاص خود تأثیر گذارند و اصلاً رابطه طولی با یکدیگر نخواهند داشت.

۴- رابطه کمی ضریب زبری هیزن-ویلیامز در شرایط مختلف

با توجه به قطرهای مختلف مطابق جدول ۱ مقادیر مختلفی تحت عنوان $C_{HW(0)}$ به دست می آید که قطر لوله، در این قسمت تأثیر می گذارد. سپس با توجه به تغییر ضریب در طول

جدول ۱۱- تغییر ضریب زبری با تغییر سن لوله و درجه خوردندگی آب در قطر ۱۲۰۰ میلی متری

سن (سال)	خوردندگی			
	جزیی	متوسط	قابل ملاحظه	زیاد
۳۰	۱۲۰	۱۰۷	۸۹	۷۳
۶۰	۱۱۲	۹۶	۷۸	۶۲
۱۰۰	۱۰۴	۸۹	۷۱	۵۴



شکل ۸- تأثیر سن لوله و خوردندگی آب در قطر ۱۲۰۰ میلی متری روی ضریب زبری

طول آن‌ها در جدول ۱۲ و مصارف و ارتفاع گره‌ها در جدول ۱۳ آورده شده است.

در واقعیت اگر دوره طرح شبکه مورد نظر، ۲۵ سال و درجه خوردنگی آب درون شبکه، به‌طور متوسط ($pH=8/8$) فرض شود، با توجه به ضریب هیزن-ویلیامز اولیه متوسط ۱۳۰ برای لوله‌ها در شبکه، ضریب هیزن-ویلیامز واقعی متوسط حدوداً برابر ۹۰ خواهد شد. با این تغییر، مجدداً شبکه مورد نظر، به‌طور واقعی طراحی می‌شود و نتایج طراحی شبکه در دو حالت (معمول و واقعی)، مطابق جدول ۱۴ مقایسه می‌شوند. منظور از حالت معمول، همین حالتی است که ضریب هیزن-ویلیامز را بدون در نظر گرفتن عوامل مؤثر و در ابتدای دوره طرح اعمال می‌کنند و حالت واقعی حالتی است که ضریب هیزن-ویلیامز با در نظر گرفتن عوامل مؤثر و در انتهای دوره طرح اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که طراحی‌های صورت گرفته در دو حالت با توجه به سرعت‌های حداقل و حداکثر ۰/۳ و ۲ متر بر ثانیه و فشارهای حداقل و حداکثر ۳۰ و ۶۰ متر آب و همچنین تحلیل مبتنی بر تقاضا (DDSM) بوده است.

همان‌طور که از مقایسه دو حالت برمی‌آید، قطر لوله‌ها در حالت واقعی به‌طور کلی افزایش داشته و به‌همین دلیل افزایش قیمت در اجرای لوله‌ها مشاهده می‌شود. اما اگر از قطرهای

جدول ۱۲- اندازه و هزینه لوله‌های قابل انتخاب برای شبکه مرجع

ردیف	قطر لوله (mm)	هزینه بر واحد طول (\$/m)
۱	۲۵۴	۲
۲	۵۰۸	۵
۳	۷۶۲	۸
۴	۱۰۱۶	۱۱
۵	۱۵۲۴	۱۶
۶	۲۰۳۲	۲۳
۷	۲۵۴	۳۲
۸	۳۰۴۸	۵۰
۹	۳۵۵۶	۶۰
۱۰	۴۰۶۴	۹۰
۱۱	۴۵۷۲	۱۳۰
۱۲	۵۰۸	۱۷۰
۱۳	۵۵۸۸	۳۰۰
۱۴	۶۰۹۶	۵۵۰

زمان، عمر لوله خود را در رابطه (۹) تحت عنوان $C_{HW(t)}$ نشان می‌دهد و در نهایت با تغییر درجه خوردنگی آب، ضریب واقعی مطابق رابطه (۱۰) تحت عنوان $C'_{HW(t)}$ تغییر می‌کند. بنابراین با تلفیق این سه تأثیر، می‌توان یک رابطه جامع به‌صورت رابطه (۱۱) برای ضریب هیزن-ویلیامز لوله‌های چدنی تعریف کرد.

$$C'_{HW(t)} = C_{HW(0)} + 19.5 \times pH + 0.005 \times t^2 - 0.9 \times t - 190 \quad (11)$$

که $C_{HW(0)}$: مقدار ضریب هیزن-ویلیامز در ابتدای عمر لوله در درجه خوردنگی جزئی، $C'_{HW(t)}$: ضریب هیزن-ویلیامز در سن t در درجه خوردنگی مدنظر و pH : مقدار معادل درجه خوردنگی مدنظر خواهد بود.

همچنین برای این که بتوان صحت حدودی رابطه را مشخص نمود، یک مثال با مقادیر آزمایشگاهی (Lamont 1981) مقایسه می‌شود. برای مقایسه، ضریب زبری یک لوله ۱۵۰ میلی‌متری را در سن ۶۰ سال با درجه خوردنگی متوسط آب در نظر بگیرید که اطلاعات آن به شکل زیر است:

$$\begin{aligned} pH &= 8.8 \\ C_{HW(0)} &= 133 \\ t &= 60 \text{ (years)} \\ C'_{HW(60)} &= 133 + 19.5 \times 8.8 + 0.005 \times 60^2 - 0.9 \times 60 - 190 = 78.6 \end{aligned}$$

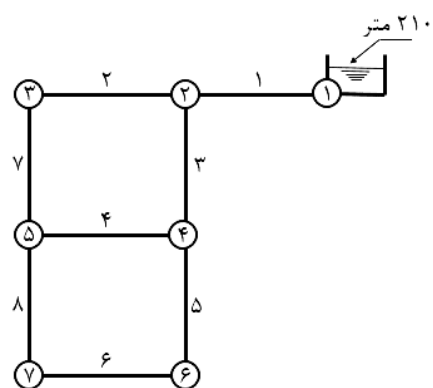
با توجه به مقادیر جدول ۲ که مقادیر ضریب زبری را برای تمامی حالات ارائه کرده است، مقدار ضریب زبری برابر ۷۹ در نظر گرفته شده است که دقت این رابطه را در تخمین ضریب هیزن-ویلیامز نشان می‌دهد.

۵- مطالعه موردی

در نهایت برای این که تأثیر عوامل مؤثر در طراحی و تحلیل شبکه توزیع آب روشن شود، یک شبکه مرجع دو حلقه‌ای مطابق شکل ۹ مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شبکه برای اولین بار توسط Alperovits and Shamir (1977) معرفی شد که از ۷ گره و ۸ لوله تشکیل شده است و از یک مخزن با هد ثابت ۲۱۰ متر تغذیه می‌شود. طول تمامی لوله‌ها ۱۰۰۰ متر و ضریب هیزن-ویلیامز آن‌ها برابر ۱۳۰ است. ۱۴ قطر تجاری برای طراحی شبکه معرفی شده‌اند که به‌همراه هزینه واحد

جدول ۱۳- مشخصات گره‌ها در شبکه مرجع

شماره گره	ارتفاع (m)	مصرف (m ³ /h)
۱ (مخزن)	۲۱۰	-۱۱۲۰
۲	۱۵۰	۱۰۰
۳	۱۶۰	۱۰۰
۴	۱۵۵	۱۲۰
۵	۱۵۰	۲۷۰
۶	۱۶۵	۳۳۰
۷	۱۶۰	۲۰۰



شکل ۹- شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای (Alperovits and Shamir, 1977)

محاسباتی در حالت معمول به دلیل هزینه کمتر استفاده شود، با توجه به تغییر ضریب هیزن-ویلیامز در طول عمر شبکه، میزان فشار در گره‌ها تغییر یافته و در انتهای دوره طرح قاعدتاً کاهش فشار در شبکه رخ می‌دهد. جدول ۱۵ مقایسه میزان

فشار گرهی را (با به کارگیری قطرهای محاسباتی در حالت معمول) در دو حالت نشان می‌دهد. نتایج حاصله از طراحی و تحلیل شبکه دوحلقه‌ای نشان می‌دهد:

۱. اگر عوامل مؤثر در تغییر ضریب هیزن-ویلیامز (قطر لوله، عمر لوله و درجه خوردگی آب) در طراحی اولیه شبکه در نظر گرفته شود، قطر لوله‌ها به طور کلی افزایش می‌یابد و این افزایش در قطر لوله‌ها، افزایش حدود ۵۰ درصدی در هزینه‌های لوله‌گذاری را به همراه دارد. بنابراین از نگاه مجریان طرح، استفاده از قطرهای محاسباتی در حالت معمول مطلوب خواهد بود.

۲. در طرف مقابل با در نظر گرفتن عوامل مذکور و اعمال تغییر در تحلیل شبکه معمول، فشار متوسط شبکه حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد؛ یعنی اگر قطرهای معمول استفاده شود، در انتهای دوره طرح، فشار شبکه ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین از نگاه مهندسان طرح، استفاده از قطرهای محاسباتی در حالت واقعی مطلوب خواهد بود. بنابراین با توجه به تقابل دو هدف (کاهش قیمت و فشار مناسب) در طراحی و تحلیل این شبکه، با توجه به نظر تصمیم‌گیرنده و اهمیت و وزن هر کدام از دو هدف مذکور، استفاده از قطرهای واقعی یا معمول توجیه‌پذیر خواهد بود. از دیدگاه نویسندگان به دو دلیل استفاده از قطرهای واقعی توصیه می‌شود:

الف) افزایش هزینه تنها در ابتدای دوره طرح تحمیل می‌شود و با سرمایه‌گذاری بیشتر کارفرما و بهینه‌سازی دیگر اجزای شبکه قابل جبران خواهد بود، اما کاهش فشار در طول عمر شبکه،

جدول ۱۴- نتایج طراحی شبکه مرجع در دو حالت معمول و واقعی

شماره لوله	قطر طراحی شده در حالت معمول (mm)	هزینه لوله در حالت معمول (هزار دلار)	قطر طراحی شده در حالت واقعی (mm)	هزینه لوله در حالت واقعی (هزار دلار)
۱	۴۵۷٫۲	۱۳۰	۵۵۸٫۸	۳۰۰
۲	۳۰۴٫۸	۵۰	۴۵۷٫۲	۱۳۰
۳	۴۰۶٫۴	۹۰	۴۰۶٫۴	۹۰
۴	۱۵۲٫۴	۱۶	۱۰۱٫۶	۱۱
۵	۳۵۵٫۶	۶۰	۳۵۵٫۶	۶۰
۶	۲۰۳٫۲	۲۳	۷۶٫۲	۸
۷	۳۵۵٫۶	۶۰	۳۵۵٫۶	۶۰
۸	۲۵۴	۳۲	۳۵۵٫۶	۶۰
کل شبکه	هزینه کل	۴۶۱	-	۷۱۹

جدول ۱۵- میزان فشار گرهی (با به کارگیری قطرهای به دست آمده) در دو حالت معمول و واقعی

شماره گره	فشار در حالت معمول (متر آب)	فشار در حالت واقعی (متر آب)
۲	۵۳	۴۸
۳	۳۴	۲۵
۴	۴۳	۳۷
۵	۴۲	۳۱
۶	۲۹	۲۰
۷	۳۰	۱۸
فشار متوسط شبکه	۳۶٫۴	۲۷

لوله در انتهای دوره طرح انتخاب می‌شود. ولی در عمل ضریب زبری لوله‌های نو وارد می‌شود و این نیز در طراحی و تحلیل خطا ایجاد می‌کند. افزایش حدودی قطر لوله‌ها و به تبع آن، افزایش ۵۰ درصدی در هزینه اجرای شبکه در ابتدای دوره طرح و کاهش بیش از ۲۵ درصدی در فشار شبکه در انتهای دوره طرح، از جمله خطاهای ایجاد شده در شبکه مرجع مطالعه شده است.

۴. با توجه به این که ضریب زبری جزء خصوصیات ظاهری و ملموس لوله‌ها نیست، به همین دلیل به عنوان یک پارامتر کم‌تأثیر به آن نگاه می‌شود و اهمیت قطر لوله‌ها و دیگر متغیرها، مانع در نظر گرفتن تغییرات زبری لوله‌ها می‌شود. به این دلیل است که مطالعات کمتری در این زمینه نسبت به بقیه مشخصات شبکه انجام شده است. بنابراین لازم است مطالعات گسترده آزمایشگاهی و میدانی بر روی کلیه عوامل مؤثر بر زبری لوله‌ها برای انواع جنس‌های مختلف لوله‌ها انجام شود.

۷- مراجع

- معاونت نظارت راهبردی ریاست جمهوری، (۱۳۹۲)، "ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب شهری و روستایی"، نشریه ۱۱۷-۳ (بازنگری اول)، (نشریه ۳۸۰-الف، طرح استانداردهای وزارت نیرو).
- Alperovits, E., and Shamir, U., (1977), "Design of optimal water distribution systems", *Water Resources Research*, 13(6), 885-900.
- Colebrook, C.F., and White, C.M., (1937), "The reduction of carrying capacity of pipes with age", *Journal Institute of Civil Engineering*, 7(1), 99-118.
- Dini, M., and Tabesh, M., (2014), "A new method for simultaneous calibration of demand pattern and

مصرف‌کنندگان را دچار مشکل خواهد کرد.

ب) از دیدگاه اهمیت موضوع، میزان رضایت مصرف‌کنندگان نسبت به فاکتورهای دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار است و چه بسا در طول عمر شبکه احتمال بازسازی و نوسازی شبکه در جهت افزایش فشار شبکه، هزینه‌های بیشتری را به کارفرما تحمیل نماید.

۶- نتیجه گیری

با توجه به مطالعات و بررسی‌های دقیق‌تری که انجام شد، نتایج مفیدی به دست آمده است که به اختصار به آن‌ها اشاره می‌شود:

۱. ضریب زبری نمایانگر زبری لوله‌ها است و به این دلیل تأثیر مستقیم بر روی مصرف بابت تأثیر آن روی فشار شبکه خواهد داشت، بنابراین تغییر در ضریب زبری باعث تغییر در مصارف و اهداف طراحی خواهد شد.

۲. در نرم‌افزارهایی مثل WaterGEMS با توجه به جنس لوله، ضریب زبری داده می‌شود و سپس تحلیل و طراحی صورت می‌گیرد. این کار از یک جهت صحیح است ولی از این جهت که برای قطرهای مختلف، مقادیر ضریب زبری متفاوت خواهد بود، از همان ابتدا، خطای بزرگی به صورت ناخواسته در شبکه ایجاد می‌شود.

۳. در نرم‌افزارهایی مثل WaterGEMS در آخر دوره طرح مثلاً ۲۵ سال از ابتدای بهره‌برداری، طراحی و تحلیل صورت می‌گیرد. بنابراین ضرایب زبری باید با توجه به عمر ۲۵ ساله لوله‌ها در طراحی لحاظ شود. همچنین در بازنگری اول نشریه ۱۱۷-۳ (معاونت نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۹۲)، به این مسئله اشاره شده است که با توجه به تأثیر عوامل مختلف روی زبری لوله‌ها، ضریب زبری لوله‌ها با در نظر گرفتن وضعیت

- Hazen-Williams coefficients in water distribution systems”, *Water Resources Management*, 28(7), 2021-2034.
- Jain, A.K., Mohan, D.M., and Khanna, P., (1978), “Modified Hazen-Williams formula”, *Journal of the Environmental Engineering Division*, 104(1), 137-146.
- Lamont, P.A., (1969), “The choice of pipe flow laws for practical use”, *Water and Water Engineering*, 73(875), 9-17.
- Lamont, P.A., (1981), “Common pipe flow formulas compared with the theory of roughness”, *Journal of American Water Works Association*, 73(5), 274-280.
- Locher, F.A., (2000), “Discussion of Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(2), 167-169.
- Moghazi, H.M., (1998), “Estimating Hazen-Williams coefficient for polyethylene pipes”, *Journal of Transportation Engineering*, 124(2), 197-199.
- Sherri, F., Mahvi, A.H., Yoloee Eshlaghy, A., and Hassani, A.H., (2017), “A new approach in simultaneous calibration of Hazen-Williams coefficients and demand of nodes in water distribution systems”, *Desalination and Water Treatment*, 74(1), 137-148.
- Travis, Q.B., and Mays, L.W., (2007), “Relationship between Hazen-William and Colebrook-White roughness values”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(11), 1270-1273.
- Valiantzas, J.D., (2005), “Modified Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for friction and local head losses along irrigation laterals”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(4), 342-350.
- Yildirim, G., and Ozger, M., (2009), “Neuro-fuzzy approach in estimating Hazen-Williams friction coefficient for small-diameter polyethylene pipes”, *Advances in Engineering Software*, 40(8), 593