Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 5, No. 3, PP. 48-59, Autumn 2020
DOI: 10.22112/jwwse.2020.214126.1181

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال پنجم، شماره ۳، صفحات ۴۸-۵۹، پاییز ۱۳۹۹

Technical Note

Hydraulic Simulation of Rural Water Distribution Network Aiming at Reduced Leakage (Case Study: Ghorakhk Village, Binalood Region)

Hashem Kouchekzadeh Dandansaz[1*], Mohammad Soltani Asl[2] and Amir Joneidi[3]

1- M.Sc. in Civil-Environmental Engineering, Mashhad Water and Wastewater Company, Mashhad, Iran.

2- Ph.D. in Civil Engineering, Assistant Professor of Asrar Higher Education Institute, Director of Network Operation and Development of Water, Khorasan Razavi Water and Wastewater Company, Iran.

3- B.Sc. in Civil Engineering, Khorasan Razavi Water and Wastewater Company, Iran.

* Corresponding author, Email: koochakzadehh@abfamashhad.ir

Received: 13/01/2020
Revised: 04/10/2020
Accepted: 10/10/2020

Abstract

In water distribution systems, pressure is one of the most important factors affecting leakage. Accordingly pressure management is an integral part of the leak reduction strategy. The main purpose of pressure management is to minimize network leakage by providing minimal pressure on network nodes. Using the pressure control valves (PRV) in the water networks is one of the common methods to reduce water leakage. In this study, with the aim of determining the optimal pressure in the network, the water distribution network was analyzed using WaterGEMS and ArcGIS software and based on field data. The modeling results showed that the pressure distribution in the network is uneven and some network nodes are experiencing non-optimal pressure. Therefore, based on the topography of the area, three pressure optimization scenarios were implemented in the model, which reduced the average night network pressure by 32% to 53%. The results showed that the infrastructure network leakage index (ILI) was reduced by 23.18 to 13.96, which showed a decrease of 28% to 40%. Finally, the calculations showed that by applying these scenarios, network leakage can be reduced by 24.2% to 34.5%.

Keywords: Distribution network, Hydraulic modeling, Leakage, Pressure management.

مقاله ترویجی (یادداشت فنی)

مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب روستایی به‌منظور کاهش نشت (مطالعه موردی: روستای گراخک، شهرستان بینالود)

هاشم کوچک زاده دندانساز[1*]، محمد سلطانی اصل[2] و امیر جنیدی[3]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، مهندسی محیط‌زیست، شرکت آب و فاضلاب مشهد، مشهد، ایران.

۲- دکتری مهندسی عمران، استادیار مؤسسه آموزش عالی اسرار مشهد، مدیر بهره‌برداری و توسعه شبکه شرکت آب و فاضلاب خراسان رضوی، مشهد، ایران.

۳- کارشناس عمران، شرکت آب و فاضلاب خراسان رضوی، مشهد، ایران.

* نویسنده مسئول، ایمیل: koochakzadehh@abfamashhad.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۳
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹/۰۷/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

چکیده

از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نشت در سیستم‌های توزیع آب، فشار شبکه است و مدیریت فشار از استراتژی‌های مهم کاهش نشت شبکه‌های آبرسانی است. هدف اصلی مدیریت فشار در سیستم‌های توزیع آب به‌حداقل رساندن نشت با بهینه‌سازی فشار، در گره‌های مصرف شبکه است. یکی از روش‌های معمول برای تحقق این امر استفاده از شیرهای کنترل فشار است. در این تحقیق به‌منظور بررسی وضعیت فشار در محدوده شبکه توزیع منطقه موردمطالعه و تعیین سناریوهای فشار بهینه شبکه، نسبت به تهیه مدل هیدرولیکی بر اساس اطلاعات میدانی موردنیاز توسط نرم‌افزارهای ArcGIS و WaterGEMS اقدام شد. نتایج اولیه نشان می‌دهد توزیع یکنواخت فشار در شبکه وجود ندارد و برخی مناطق از فشار بهینه برخوردار نیستند. برای بررسی اثرات مدیریت فشار، سه سناریو بهینه‌سازی بر مبنای تأمین حداقل فشار در مدل تعریف شد. نتایج نشان می‌دهد که با اعمال این سناریوها متوسط فشار شبانه شبکه بین ۳۲٪ تا ۵۳٪ کاهش می‌یابد. هم‌چنین محاسبات نشان داد شاخص نشت زیرساخت شبکه توزیع روستا از ۲۳/۱۸ تا ۱۳/۹۶ تقلیل یافت که کاهشی بین ۲۸٪ تا ۴۰٪ را نشان می‌دهد. درنهایت نشت شبانه شبکه بین ۲۴/۲٪ تا ۳۴/۵٪ کاهش یافت که تجمیع نتایج حاکی از امکان بهره‌برداری پایدار شبکه خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: مدیریت فشار، نشت، شبکه توزیع، مدل‌سازی هیدرولیکی.

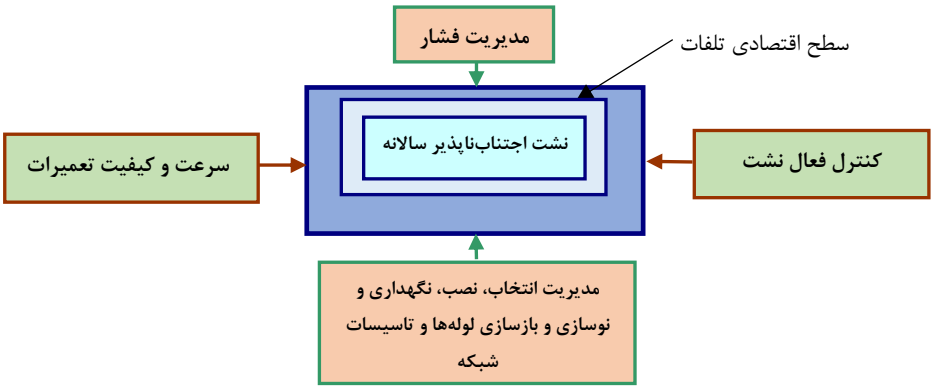
۱- مقدمه

یکی از چالش‌های جدی کشورهای در حال‌توسعه، توجه به حفظ منابع آب و بهره‌برداری بهینه از آن در کنار بهبود زیرساخت‌های توسعه است. در طی سال‌های اخیر برنامه‌ریزان منابع آبی توجه خود را به مدیریت منابع آب و عرضه آن معطوف کرده و به مطالعه در زمینه مسائل عمده بخش آب ازجمله کم‌آبی و برطرف کردن مشکلات موجود در این زمینه پرداخته‌اند.

به دلیل هزینه‌های بالای ساخت و نگهداری سازه‌های کنترل، نگهداری آب‌های سطحی مانند سدها و بندها، تأسیسات لازم برای استخراج آب از منابع زیرزمینی و هزینه‌های تصفیه و سالم‌سازی آب، در سال‌های اخیر، کم کردن تلفات آب به‌عنوان یکی از راهبردی‌ترین و اقتصادی‌ترین راه‌های مقابله با کم‌آبی در کشور مطرح شده است. در این راستا، حفاظت و نگهداری از آب موجود در شبکه به‌عنوان یکی از راه‌کارهای ارزان‌قیمت در پروژه‌های آبی موردتوجه شرکت‌های آب و فاضلاب قرارگرفته است. از طرف دیگر، با توجه به اهمیت آب از لحاظ استراتژیکی، افزایش رو به رشد جمعیت، کاهش نسبی مقدار نزولات جوی و مناقشات مرزی بر سر مالکیت آب‌های سطحی و از همه مهم‌تر کمبود منابع آبی قابل استحصال موجود در کشور، چاره‌ای جز استفاده بهینه و کامل از منابع موجود نیست. بنابراین جلوگیری از هدررفت آب، می‌تواند یک راه‌کار مناسب برای ذخیره آب در کشور باشد (ملاباشی و دستگردی، ۱۳۹۵).

نشت در شبکه‌های آبرسانی تابع عوامل مختلفی ازجمله فشار آب، قدمت لوله‌ها، کیفیت آب و خاک، کیفیت اجرا، کیفیت لوله‌ها و متعلقات، ضربه و بارهای جانبی نظیر ترافیک است. به‌منظور مدیریت مناسب نشت، شناخت پارامترهای مؤثر بر نشت ضروری است. موضوع مهم در مدیریت نشت، این است که نشت چگونه کنترل شود و کدام فاکتورها بیشترین اهمیت را ازنظر تأثیر بر میزان نشت دارند. اگر بتوان فاکتورهای کلیدی تأثیرگذار بر نشت را شناسایی کرد، آن‌گاه پیش‌بینی اثرات احتمالی فعالیت‌های مختلف کاهش نشت ممکن خواهد بود. در تحقیقاتی که از سوی انجمن بین‌المللی آب (IWA)[1] در زمینه مدیریت نشت انجام‌گرفته، نشان داده شده است که چهار پارامتر مدیریت فشار، کنترل فعال نشت، سرعت و کیفیت تعمیرات، مدیریت انتخاب، نصب، نگهداری و نوسازی و بازسازی لوله‌ها و تأسیسات شبکه، بیشترین اثر را بر روی نشت دارند (شکل ۱) (Thornton and Lambert, 2005).

مدیریت فشار عبارت است از اعمال کنترل روی فشارهای سیستم برای رسیدن به یک سطح فشار بهینه، مناسب برای سیستم آبرسانی به‌گونه‌ای که علاوه‌بر حذف تغییرات و ناپایداری در فشار، حداقل فشار لازم برای تأمین حقوق قانونی مشترکان و مصرف‌کنندگان فراهم شود (ملاباشی و دستگردی، ۱۳۹۵). نرخ تلفات واقعی آب از شبکه‌های توزیع تابعی از سطح فشار شبکه است (Giustolisi et al., 2008). مقدار نشت در سطح شبکه و به‌خصوص مقدار نشت از اتصالات و لوله‌های غیرفلزی، به‌شدت به سطح فشار شبکه وابسته است (Lambert, 2000). از طرف دیگر افزایش ناگهانی فشار و پدیده سرج[2] باعث ایجاد نقاط نشت جدید می‌شود. بر این اساس امروزه مدیریت فشار درسطح شبکه به‌عنوان یکی از کارآمدترین و اقتصادی‌ترین سیاست‌های کاهش نشت اهمیت زیادی پیدا کرده است (AbdelMeguid et al., 2011). اثر فشار روی نشت بالاترین و فوری‌ترین اثر بر روی تمامیت نشت بوده و هر تغییری در فشار آب باعث تغییر در آهنگ نشت از شبکه می‌شود (جعفری اصل، ۱۳۹۵).



شکل ۱- روش‌ها و استراتژی‌های کنترل نشت (IWA)

سلطانی اصل و فغفور مغربی (۱۳۸۸) فشار را یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در میزان آب بدون درآمد در شبکه‌های توزیع دانسته و نشان دادندکه کنترل هوشمند فشار دارای بیشترین و سریع‌ترین اثر هیدرولیکی بر روی مقدار نشت و کاهش

صدمات ناشی از فشارهای زیاد در شبکه است. در این پژوهش ابتدا شبکه موردنظر با بهره‌گیری از تلفیق روش اندازه‌گیری جریان حداقل شبانه و تحلیل هیدرولیکی با استفاده از قابلیت نرم‌افزار EPANENT، مدل‌سازی شد. سپس با استفاده از نتایج مدل، در شیر فشارشکن ورودی شبکه، یک برنامه زمانی تغییرات هد فشار خروجی در طول ساعات روز و بر مبنای تأمین حداقل فشار در کم‌فشارترین نقطه، تعیین و اعمال شد. نتایج نشان داد که می‌توان با استفاده از این روش مدیریت فشار، ضمن کاهش نشت شبانه به حدود ۳۵٪، توزیع فشار را در شبکه یکنواخت‌تر نمود. در تحقیقی دیگر ملاباشی و دستگردی (۱۳۹۵) به کاربرد مدیریت فشار در کاهش حوادث خط انتقال آب پرداختند. آن‌ها در این مقاله نشان دادند که می‌توان از مدیریت فشار به‌عنوان یک روش عملیاتی و اجرایی در خطوط انتقال برای کاهش حوادث خط انتقال استفاده نمود. بدین منظور خط انتقال شهر سجزی استان اصفهان به‌عنوان زمینه تحقیق انتخاب شد. حریری اصلی و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از مفهوم حداقل جریان شبانه آب و مدیریت هوشمند فشار و تحلیل داده‌ها توسط نرم‌افزار WeterGEMS از منطق فازی به مثابه یک گزینه مدل‌سازی در انطباق با GIS استفاده نمودند.

Pilipovic and Taylor (2003) نتایج مطالعه‌ای پیرامون طرح و کاربرد یک برنامه استانداردسازی فشار در شبکه را که در شهر ویت‌کایر کشور نیوزلند به اجرا در آمده است، ارائه کردند. نتایج حاکی از آن است که این برنامه با هزینه کلی ۸۵۰۰۰۰ دلار(نیوزلند)، در طول سه سال موجب ۱۰ درصد کاهش مصرف آب، ۵ درصد کاهش فاضلاب (با صرفه‌جویی بالغ بر ۵۰۰۰۰۰ دلار در سال)، کاهش تلفات آبی (با صرفه‌جویی نزدیک به ۳۰۰۰۰۰ دلار در سال) کاهش حوادث و شکست‌های بزرگ و افزایش عمر مفید شبکه تا حدود ۱۰ الی ۲۰ سال شده است. Thornton and Lambert (2006) نشان دادند که هم بزرگی و هم رخداد نشت‌های جدید با کاهش و ثبات فشار در سیستم کاهش می‌یابند. هم‌چنین کاهش فشار نه فقط باعث کاهش میزان نشت از منافذ موجود می‌شود بلکه باعث کاهش نشت‌های جدید خواهد شد.

در این پژوهش علاوه‌بر بررسی تأثیر مدیریت فشار در کاهش نشت، به‌خصوص در شبکه های آب شرب روستایی، از مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه به‌عنوان ابزاری برای پایش شبکه استفاده می‌شود. هم‌چنین شاخص نشت زیرساخت به‌عنوان فاکتوری مهم در آب بدون درآمد مورد سنجش و ارزیابی قرار خواهد گرفت. در این تحقیق متوسط فشار شبانه منطقه به‌عنوان پایه تحقیق درنظر گرفته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادلات حاکم

در بهره‌برداری و کنترل شبکه‌های آبرسانی همواره دو پارامتر دبی (میزان تولید یا مصرف) توسط جریان‌سنج‌های موجود در مخازن (یا نقاط دیگر شبکه) و هد در بین دو نقطه توسط فشارسنج‌ها پایش می‌شوند. براساس مقادیر هد و دبی، پارامترهای مختلفی در شبکه آبرسانی محاسبه می‌شوند. این روابط پایه که همان اصل پیوستگی و اصل انرژی (قانون برنولی) هستند در روابط (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند (Walski et al., 2003):

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = 0 \qquad (۱)$$

$$Head = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{L_{1-2}} \qquad (۲)$$

که Q_{in} و Q_{out}: مقادیر دبی ورودی و دبی خروجی به گره را برحسب واحد حجم سیال بر زمان بیان می‌کنند. در رابطه برنولی نیز پارامترهای Z، P، V، h_{L1-2} و $Head$: به‌ترتیب بیانگر ارتفاع گره موردنظر تا خط مبنا (m)، فشار در گره ($m\ H2O$)، سرعت سیال در گره (m/s)، افت هد ناشی از اصطکاک بین گره‌های ۱ و ۲ (m) و انرژی سیال یا هد کلی آن (m) هستند.

برای محاسبه افت هد طولی روابط مختلفی همچون رابطه هیزن-ویلیامز، رابطه مانینگ و رابطه دارسی-وایسباخ ارائه شده است. از بین این روابط، رابطه هیزن-ویلیامز (رابطه (۳)) در شبیه‌سازی‌ها (ورودی نرم‌افزارهایی چون WaterGEMSs و EPANET) بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rossman, 2000):

$$h = 10.68 \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} . D^{-4.87} . L \qquad (۳)$$

که h: افت فشار (متر)، Q: دبی (مترمکعب در ثانیه)، L: طول لوله (متر)، C: ضریب زبری لوله (بدون بعد) و D: قطر لوله (متر) هستند. این فرمول یک فرمول تجربی است که در نیم قرن اخیر کاربرد زیادی در طراحی خطوط انتقال و توزیع آب پیدا کرده است؛ اما دارای نقاط ضعفی است که از جمله می‌توان به تجربی بودن آن اشاره کرد، درحالی‌که رابطه دارسی وایسباخ رابطه‌ای کاملاً علمی و آکادمیک است. طبق مبانی نظری هیدرولیک،

معادله یک جریان کاملاً آشفته Q از یک منفذ با مقطع ثابت A و هد استاتیک ثابت به‌صورت رابطه (۴) است (Thornton et al., 2008):

$$Q = KA\sqrt{2gh} \quad (۴)$$

که Q: با سطح مقطع منفذ A: و سرعت خروج سیال حقیقی (V) که خود با ریشه دوم هد استاتیکی فشار و ضریب جریان K تغییر می‌کند، متناسب است. اگر سطح مقطع منفذ یا ضریب جریان نیز با فشار تغییر کند آن‌گاه تغییرات جریان حساسیت بیشتری به تغییرات فشار خواهد داشت (Thornton et al., 2008). لذا به‌عنوان یک رابطه کلی برای تخمین نشت از رابطه (۵) استفاده می‌شود (سلطانی اصل و فغفور مغربی، ۱۳۸۸):

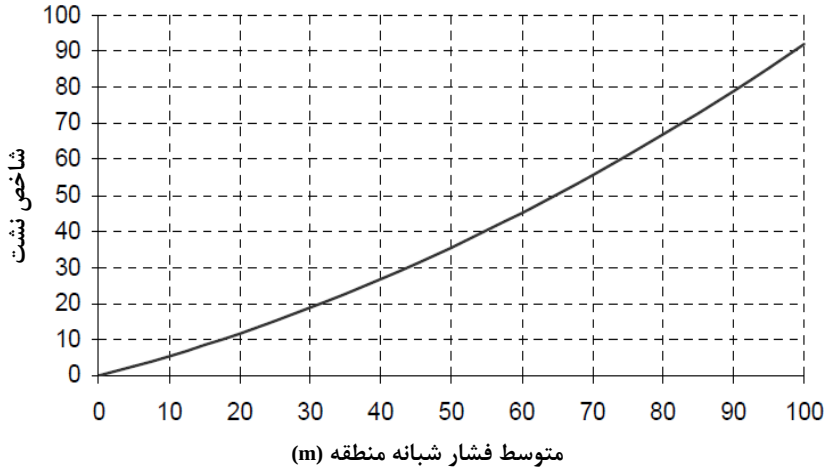
$$Q = cp^n \quad (۵)$$

که Q: دبی خروجی از منفذ یا نشت، p: فشار و c: ضریب تخلیه روزنه یا ضریب نشت و n: توان ثابت فشار هستند. رابطه بین فشار متوسط شبانه منطقه (AZNP)[۳] و شاخص نشت[۴] که توسط مطالعات مرکز تحقیقات آب انگلستان[۵] به‌دست آمده در شکل ۲ نشان داده شده است (نشریه شماره ۵۵۶، ۱۳۹۱). مشاهده می‌شود که منحنی تا فشار حدود ۵۰ متر تقریباً خطی است. هم‌چنین حتی یک کاهش کوچک در فشارهای بالا می‌تواند سبب کاهش زیادی در میزان شاخص نشت شود. در تحقیقات چند تن از محققین در انگلستان و ژاپن مقادیر ۱/۱۸، ۱/۱۵ و ۱ برای توان فشار (n) پیشنهاد شده است (Lambert, 1997). از شکل ۲، رابطه (۶) به‌دست می‌آید (UWI, 1994):

$$\text{شاخص نشت } (LI) = 0.5\ AZNP + 0.0042 * AZNP^2 \quad (۶)$$

متوسط فشار شبانه منطقه در هر منطقه به‌روش‌های زیر به‌دست می‌آید (نشریه شماره ۵۵۶، ۱۳۹۱):

- متوسط مقادیر فشار در بلندترین و پست‌ترین نقاط شبکه؛
- محاسبه مقادیر فشار برای هر نقطه به وسیله یک مدل کالیبره شده تحلیل شبکه و به‌دست آوردن فشار متوسط شبکه.



شکل ۲- رابطه بین متوسط فشار شبانه منطقه و شاخص نشت (نشریه شماره ۵۵۶، ۱۳۹۱)

۲-۲- منطقه مورد مطالعه

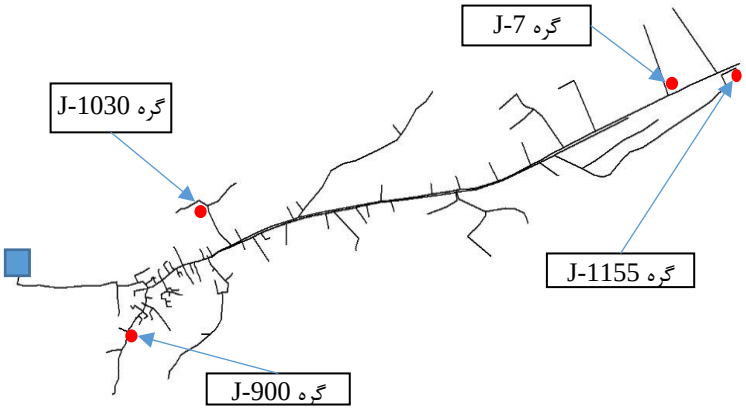
این پژوهش به مطالعه شبکه توزیع روستای گراخک شهرستان بینالود (طرقبه شاندیز) برای یافتن فشار بهینه شبکه و کاهش مقدار نشت شبانه شبکه موردنظر پرداخته است. این روستا در فاصله ۲۰ کیلومتری شمال غرب شهر مشهد و در منتهی‌الیه شهرستان بینالود و در دامنه کوه‌های بینالود واقع شده است. روستای گراخک طبق آمار رسمی سال ۱۳۹۵ جمعیتی بالغ بر ۷۴۲ نفر داشته که نسبت به سال ۱۳۹۰ رشد ۹/۱٪ را تجربه کرده است. در ایام گرم سال به‌علت ییلاقی و خوش آب و هوا بودن این روستا جمعیت از آمار رسمی نیز فزونی می‌یابد. سرانه مصرف روستا در سال ۹۶ در حدود ۱۹۰ لیتر در شبانه‌روز بوده است. تأمین آب روستای گراخک از یک ایستگاه پمپاژ توسط خط انتقال ۱۱۰ میلی‌متری (پلی اتیلین-گالوانیزه) به‌طول تقریبی ۵۰۰۰ متر صورت می‌گیرد. در محل حصارکشی، یک مخزن ۵۰۰ مترمکعبی فعال وجود دارد. شبکه توزیع روستای گراخک دارای عمر متوسط ۱۵ سال است و از جنس پلی‌اتیلن به طول ۱۱۷۰۰ متر به استثنای طول انشعابات مشترکین است. شبکه توزیع روستای گراخک بعد از طی مسیری حدود ۷۰۰ متر از خروجی

مخزن به دوشاخه اصلی منشعب شده است که وظیفه توزیع آب به دو سمت اصلی روستا را دارد.

۲-۳- جمع‌آوری اطلاعات

در نیمه دوم سال ۱۳۹۶ با نصب تعدادی فشارسنج و دیتالاگر در چند نقطه از شبکه توزیع روستای گراخک (شکل۳) قدم اول در خصوص اجرایی شدن این مهم برداشته شد. برای این‌منظور در روزهای مختلف هفته در ساعات مختلف شبانه‌روز فشار شبکه توسط دیتالاگر جمع‌آوری شد و بانک اطلاعاتی وسیعی از داده‌های فشار برحسب روز و ساعات مختلف شبانه‌روز شکل گرفت. فشار نقاط به‌طور میانگین در بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای و طی حدود ۶ ماه (۶ ماه پایانی سال ۱۳۹۶) اندازه‌گیری و در بانک اطلاعاتی شرکت آبفار خراسان رضوی ثبت شد.

برای سهولت در انجام پژوهش و به‌دلیل حجم عظیم داده‌های اندازه‌گیری شده فشار در ساعات مشخص (مطابق با ضرایب نوسانات ساعتی مصرف طی شبانه‌روز برگرفته از نشریه ۳-۱۱۷) و به‌صورت هفتگی متوسط‌گیری شدند. درنهایت میانگین مقادیر به‌دست آمده برای هر ساعت نیز محاسبه شد. نمونه‌ای از محاسبات برای یکی از نقاط در جدول ۱ قابل مشاهده است.



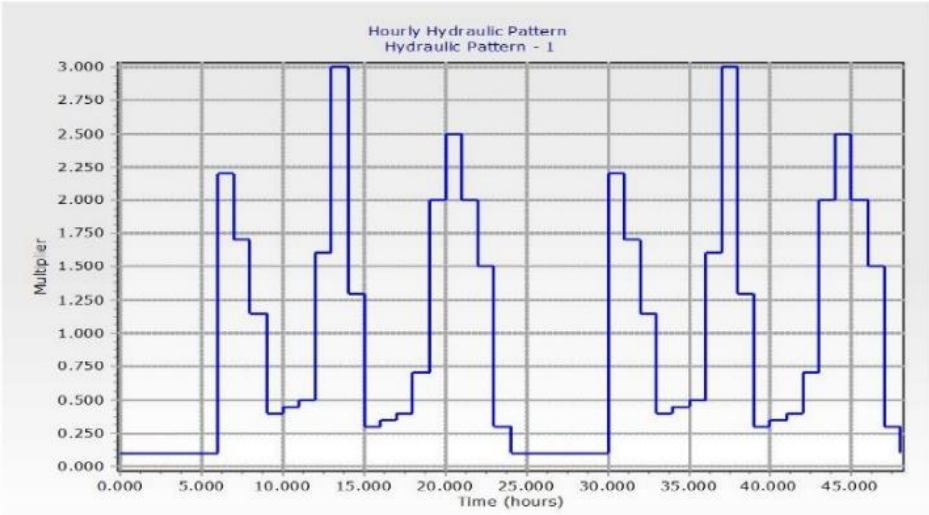
شکل ۳- موقعیت نصب فشارسنج‌ها و پراکندگی آن‌ها در سطح روستای گراخک

جدول ۱- نمونه‌ای از متوسط فشار اندازه‌گیری شده (گره J-1155)

بازه زمانی	متوسط فشار اندازه‌گیری شده (atm) در ساعات حداکثر و حداقل مصرف				
	ساعت ۶	ساعت ۹	ساعت ۱۳	ساعت ۱۵	ساعت ۱۹
۶/۱ تا ۶/۷	۳/۹۵	۷/۶۶	۷/۳۸	۶/۸۱	۶/۰۸
.....	.....	.....	.....	.....	.....
۱۰/۲۷ تا ۱۱/۳	۹/۱۰	۸/۳۶	۷/۵۹	۸/۹۴	۸/۶۴
متوسط فشار اندازه‌گیری شده برای هر ساعت طی ۶ ماه	۷/۵۴	۸/۲۴	۷/۷۲	۸/۱۶	۷/۶۲

با استفاده از آخرین فایل موجود از شبکه توزیع آب روستای گراخک، در محیط نرم‌افزار GIS کلیه لوله‌ها به‌عنوان شبکه اصلی درنظر گرفته و وارد نرم‌افزار WaterGEMS شده است. سپس، با توجه به محل قرارگیری لوله‌های اصلی، محل گره‌ها در کل محدوده مشخص شده است. پس از آن، مصارف سه دوره منتهی به پایان سال ۱۳۹۶ مشترکین روستا از بانک اطلاعاتی شرکت آب و فاضلاب روستایی خراسان رضوی برداشت شد. با بررسی مصارف مشترکین در این سه دوره مشخص شد مقدار مصارف دوره‌ها تفاوت چندانی باهم نداشته و لذا برای سهولت در کار، نسبت به متوسط‌گیری سه دوره اقدام شد. با فراخوانی اطلاعات مشترکین موجود در فایل اکسل در محیط GIS، اطلاعات مصرف براساس مصرف متوسط به نقاط رقومی قابل استفاده در WaterGEMS تبدیل شد. با استفاده از دستور Loud builder نقاط مشخص‌کننده مشترکین و مصارف هر مشترک به نزدیک‌ترین لوله منتقل شد. با توجه به کمبود اطلاعات و عدم امکان نصب کنتور حجمی برخط در ورودی و خروجی مخزن روستا، برای نوسانات ساعتی مصرف در ساعات مختلف شبانه‌روز از اطلاعات مندرج در جدول ۳-۱ نشریه ۳-۱۱۷ استفاده شد. با توجه به جمعیت کمتر از ۵۰۰۰ نفر روستای گراخک ضرایب ساعتی مصرف مذکور برای ایجاد الگو طی یک بازه زمانی ۴۸ ساعته مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۴).

مهم‌ترین مرحله در مدل‌سازی، تطبیق نتایج حاصل از مدل‌سازی با وضعیت واقعی سیستم است. معمولاً در مدل‌سازی شبکه‌ها، مقادیر فشار و دبی و به‌طورکلی پارامترهای شبکه با مقادیر محاسباتی متفاوت است. این امر ناشی از تفاوت پارامترهای طراحی با مقادیر واقعی است؛ بنابراین لازم است مدل توسط داده‌های میدانی کالیبره شود. کالیبراسیون فرایندی است که مشخصات و پارامترهای مدل را تا جایی تغییر می‌دهد که اختلاف کمیت‌های محاسبه شده توسط مدل با اطلاعات مشاهداتی به یک سطح قابل‌قبول برسد. در بین پارامترهای مختلف طراحی، مهم‌ترین پارامترها شامل زبری لوله، قطر و طول لوله، مشخصات شیرآلات و ابعاد مخازن است (ساقی، ۱۳۹۶). عطارزاده و همکاران (۱۳۹۷) با مقایسه دو الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز مهاجم و الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان نشان دادند که تنظیم ضریب زبری لوله‌ها، مصارف گرهی و قطر لوله طی کالیبراسیون کم‌ترین درصد خطا در پیش‌بینی و شبیه‌سازی را دارد. لذا با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده فشار در نقاط از پیش تعیین‌شده و مقایسه آن‌ها با مقادیر فشار به دست آمده در مدل در همان نقاط، نسبت به کالیبره نمودن هیدرولیکی شبکه اقدام شد. تنها پارامتر در دسترس و قابل‌تغییر برای کالیبراسیون شبکه ضریب زبری (هیزن-ویلیامز) لوله‌های موجود است. با تغییر ضریب زبری در مدل و تکرار محاسبات در نرم‌افزار سعی شد تا نتایج مدل شبیه‌سازی شده به اطلاعات مشاهده شده نزدیک شود.



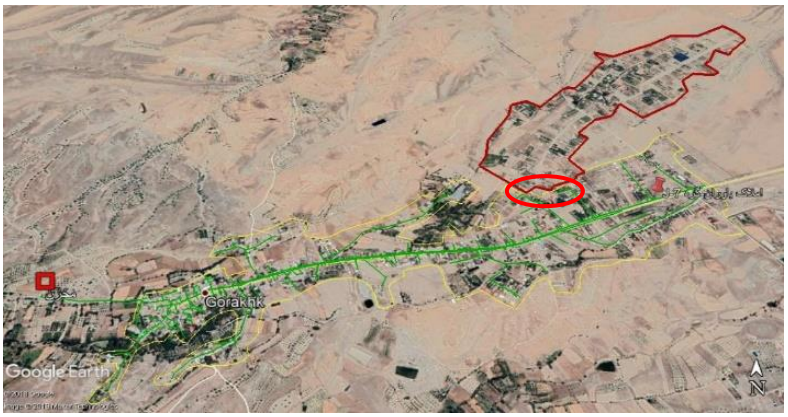
شکل ۴- الگوی هیدرولیکی ایجاد شده برای مدل

۳- نتایج

با اندازه‌گیری مقادیر فشار در نقاط از پیش تعیین شده و مقایسه آن‌ها با مقادیر مدل سعی در نزدیک کردن این مقادیر به‌هم شد. نتایج کالیبراسیون شبکه در جدول ۲ قابل مشاهده است. به‌استثناء گره J-7 در سایر نقاط اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای بین فشار اندازه‌گیری شده و فشار محاسبه شده مدل وجود ندارد که صحت کالیبراسیون را نشان می‌دهد. در مورد اختلاف زیاد مقادیر دو فشار در گره J-7 نیز پس از بررسی‌های میدانی مشخص شد قبل از گره مذکور مصارف غیرمتعارف زیادی ازجمله منطقه وسیعی از ویلاهای شخصی و خانه‌باغ وجود دارد که اکثراً نسبت به اخذ انشعاب به‌صورت غیرمجاز از شبکه اقدام نموده‌اند. این امر باعث افت شدید فشار در گره J-7 شده است (شکل ۵).

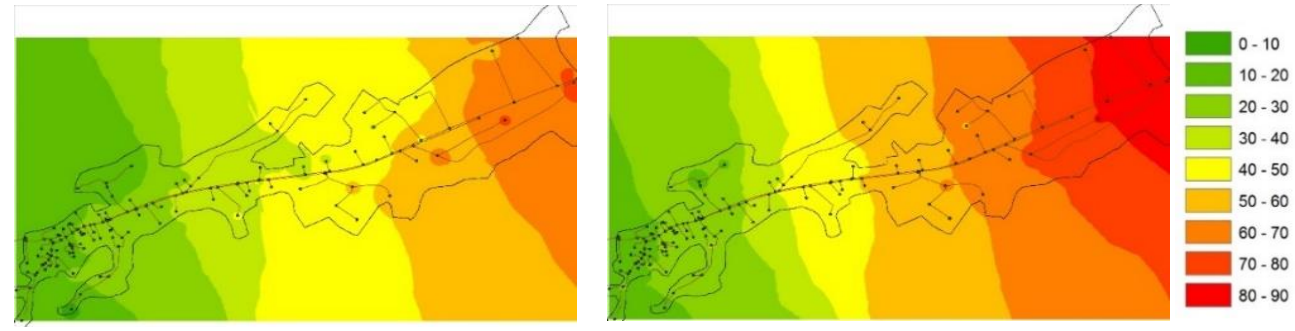
جدول ۲- اختلاف فشار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده توسط مدل بعد از کالیبراسیون شبکه

مکان اندازه‌گیری	ساعت اندازه‌گیری	متوسط فشار اندازه‌گیری شده (m)	متوسط فشار محاسبه شده مدل(m)	اختلاف (m)	اختلاف
گره J-1155	۶-۹-۱۳-۱۵-۱۹	۷۸/۵۶	۸۰/۱۸	۱/۶۲	٪۲/۰۶
گره J-900	۶-۹-۱۳-۱۵-۱۹	۱۵/۶۲	۱۵/۴۸	-۰/۱۴	٪-۰/۹۰
گره J-1030	۶-۹-۱۳-۱۵-۱۹	۱۲/۹۴	۱۲/۳۴	-۰/۶	٪-۴/۶۴
گره J-7	۶-۹-۱۳-۱۵-۱۹	۲۹/۱۲	۶۶/۶	۳۷/۴۸	٪۱۲۸/۷۱



شکل ۵- تصویر هوایی از محل انشعابات غیرمجاز روستای گراخک

نتایج محاسبه شده فشار شبکه توسط مدل در ساعت‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است.



الف- پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک در ساعت ۳ نیمه شب

ب- پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک در ساعت ۶

پ- پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک در ساعت ۹

ت- پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک در ساعت ۱۳

ث- پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک در ساعت ۱۷

ج- پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک در ساعت ۱۹

شکل ۶- پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک قبل از اعمال سناریوهای فشار

۳-۱- متوسط فشار شبانه شبکه توزیع روستای گراخک (AZNP)

متوسط فشار شبانه روستای گراخک با توجه به مقادیر فشار متوسط محاسبه شده در ساعت ۳ نیمه‌شب، مطابق شکل ۶ برابر با ۳۵/۶۷ متر است.

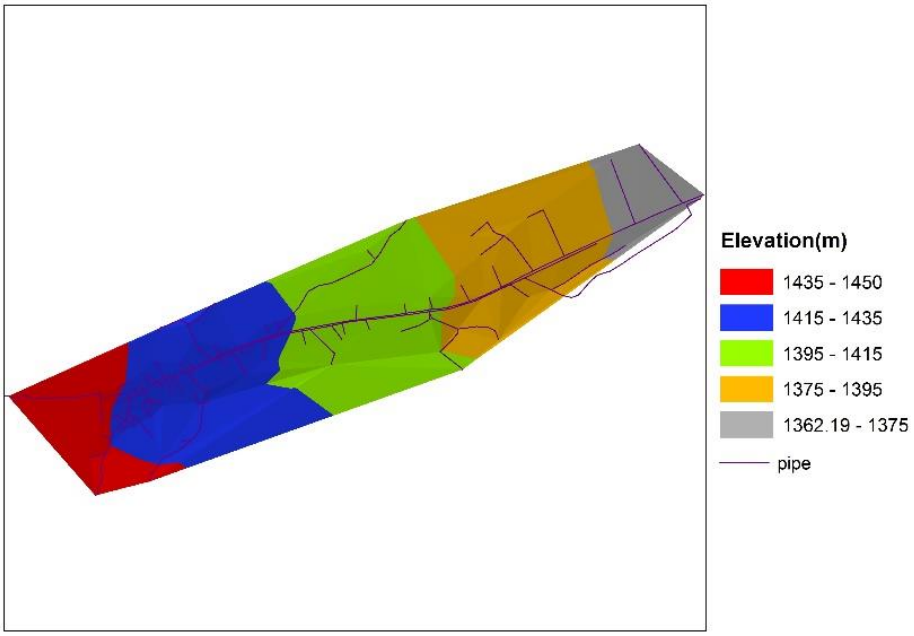
۳-۲- شاخص نشت زیرساخت شبکه توزیع روستای گراخک

با توجه به روابط بین نشت و متوسط فشار شبانه رابطه (۶) و شکل ۲، شاخص نشت شبانه شبکه ۲۳/۱۸ محاسبه شد.

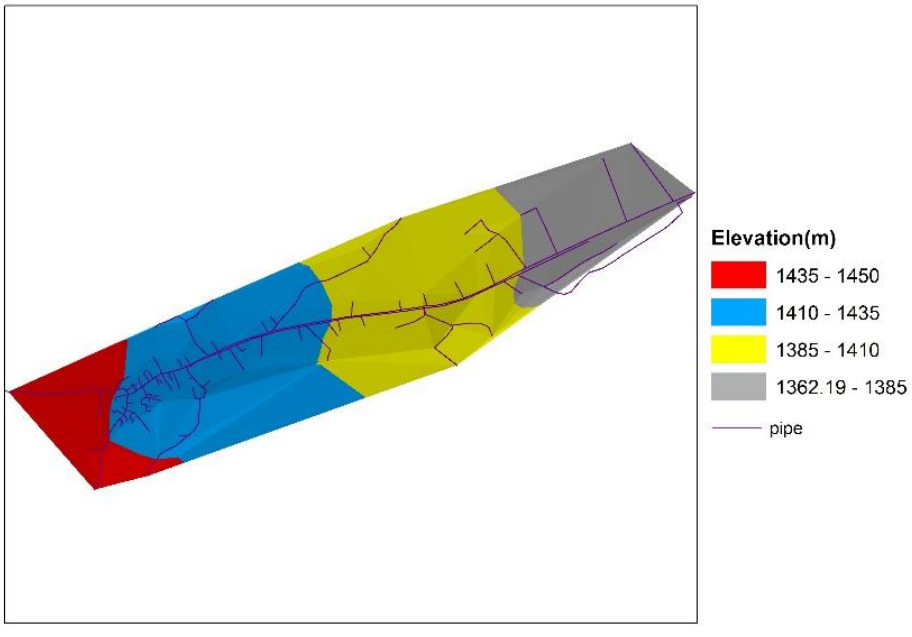
$$ILI = 0.5\,AZNP + 0.0042 * AZNP^2$$
$$AZNP = 35.67\ (m\,H2O)\ \rightarrow ILI = 23.18$$

۳-۳- سناریوهای بهینه‌سازی فشار

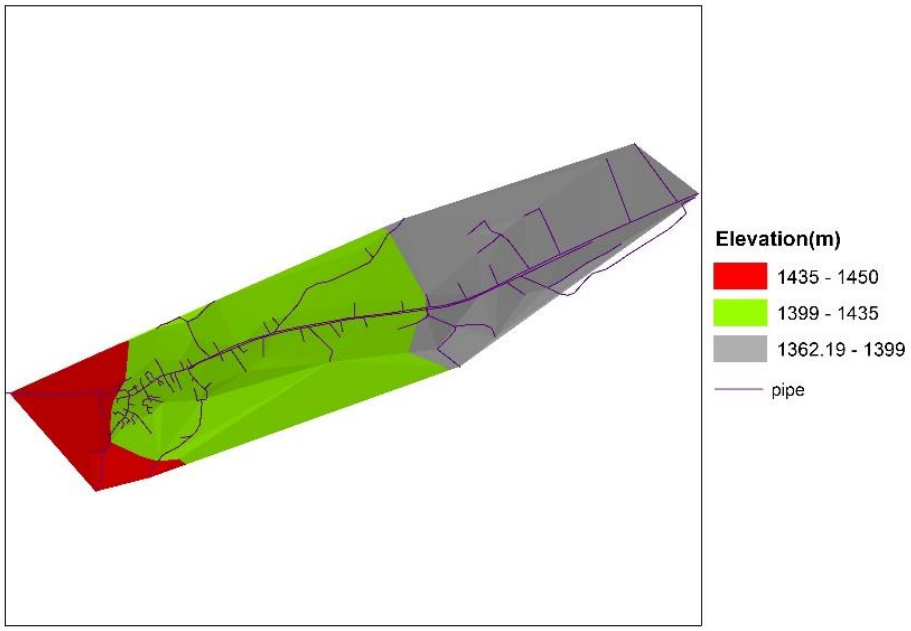
با توجه به وسعت منطقه مورد پژوهش، ۳ سناریو بهینه‌سازی فشار برای رسیدن به فشار مطلوب شبکه بر اساس کدهای ارتفاعی پیش‌بینی و در مدل اجرا شد (شکل ۷).



الف – سناریوی شماره ۱ (زون‌بندی روستای گراخک براساس ۵ زون ارتفاعی)



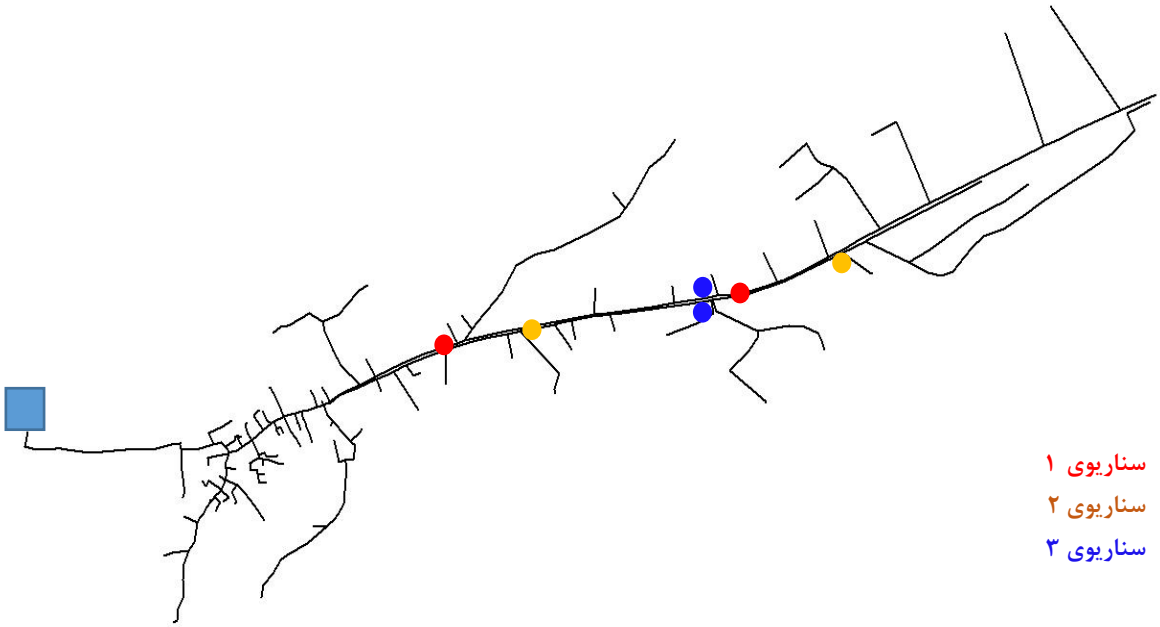
ب– سناریوی شماره ۲ (زون‌بندی روستای گراخک براساس ۴ زون ارتفاعی)



پ- سناریوی شماره۳ (زون‌بندی روستای گراخک براساس ۳ زون ارتفاعی)

شکل ۷- زون‌بندی روستای گراخک براساس کدهای ارتفاعی و سناریوهای

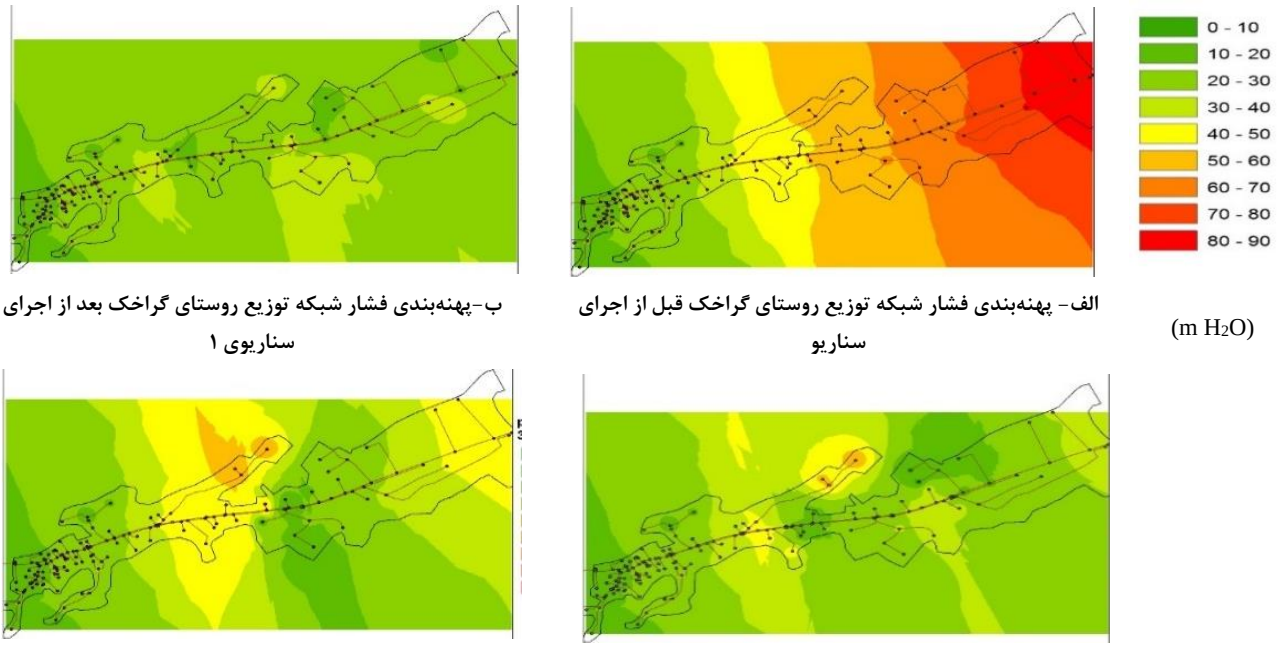
باتوجه به توپوگرافی و شکل شبکه که دو خط به موازات یکدیگر و در راستای طول روستا هستند، در هر سناریو دو عدد شیر فشارشکن با خروجی ۱/۵ اتمسفر در شبکه مطابق شکل (۸) در مرزهای مشخص شده با استفاده از زون‌بندی ارتفاعی جانمایی گردید.



شکل ۸- نقاط نصب شیرهای فشارشکن براساس زون‌های ارتفاعی

۳-۴- فشار شبکه قبل و بعد از اجرای سناریوهای سه‌گانه

شکل ۹ پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک در ساعت ۳ نیمه‌شب قبل و بعد از اجرای سناریوهای سه‌گانه را نشان می‌دهد.



الف- پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک قبل از اجرای سناریو

ب-پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک بعد از اجرای سناریوی ۱

پ- پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک بعد از اجرای سناریوی شماره ۲

ت- پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک بعد از اجرای سناریوی شماره ۳

شکل ۹- مقایسه پهنه‌بندی فشار شبکه توزیع روستای گراخک قبل و بعد از اجرای سناریوهای سه‌گانه

۳-۵- متوسط فشار شبانه شبکه توزیع روستای گراخک بعد از اجرای سناریوهای سه‌گانه

متوسط فشار شبانه شبکه توزیع روستای گراخک باتوجه به فشارهای محاسبه شده در سناریوهای سه‌گانه (شکل ۹) و دستورالعمل نشریه ۵۵۶ به‌شرح جدول ۴ محاسبه شده است.

جدول ۴- متوسط فشار شبانه شبکه توزیع روستای گراخک در سناریوهای سه‌گانه

شماره سناریو	متوسط فشار شبانه (متر)
۱	۲۳/۳۵
۲	۲۴/۵۸
۳	۲۷/۰۳

۳-۶- شاخص نشت بعد از اجرای سناریوهای سه‌گانه

با توجه به روابط بین شاخص نشت و متوسط فشار شبانه رابطه (۶) و شکل ۲ و پس از اجرای سناریوهای سه‌گانه شاخص نشت برای هر سناریو مطابق ذیل محاسبه می‌شود.

$$ILI = 0.5\,AZNP + 0.0042 * AZNP^2$$

سناریوی ۱: $AZNP = 23.35\ (m\ H2O) \rightarrow ILI = 13.96$

سناریوی ۲: $AZNP = 24.58\ (m\ H2O) \rightarrow ILI = 14.83$

سناریوی ۳: $AZNP = 27.03\ (m\ H2O) \rightarrow ILI = 16.58$

جدول ۵- شاخص نشت در هر سناریو

شماره سناریو	شاخص نشت قبل از اجرای سناریوها	شاخص نشت بعد از اجرای سناریوها	اختلاف
۱	۲۳/۱۸	۱۳/۹۶	۴۰٪
۲		۱۴/۸۳	۳۶٪
۳		۱۶/۵۸	۲۸٪

۳-۷-تغییرات فشار و نشت قبل و بعد از اجرای سناریوهای سه‌گانه

با استفاده از رابطه (۵) و درنظر گرفتن $n = 1$ (Mays, 1997)، می‌توان میزان تغییرات نشت را قبل و بعد از اجرای سناریوهای سه‌گانه فشار محاسبه نمود.

$$Q = cp^n\ , n = 1 \rightarrow \frac{Q_1}{Q_s} = \frac{p_1}{p_s} \rightarrow Q_s = Q_1(\frac{p_s}{p_1})$$

که Q_1 و Q_s: به‌ترتیب میزان نشت شبکه قبل و بعد از اجرای سناریو هستند. میزان تغییرات نشت پس از اجرای هر سناریو به شرح (جدول ۶) است.

جدول ۶- تغییرات فشار و نشت قبل و بعد از اجرای سناریوهای سه‌گانه

شماره سناریو	متوسط فشار شبانه (متر)	متوسط فشار شبانه قبل از اجرای سناریو (متر)	اختلاف مقدار متوسط فشار شبانه (متر)	اختلاف فشار	کاهش نشت
۱	۲۳/۳۵	۳۵/۶۷	۱۲/۳۲	۵۲٪/۸	۳۴٪/۵
۲	۲۴/۵۸	۳۵/۶۷	۱۱/۰۹	۴۵٪/۱	۳۱٪/۱
۳	۲۷/۰۳	۳۵/۶۷	۸/۶۴	۳۲٪/۰	۲۴٪/۲

با اجرای سناریوی ۱ هم متوسط فشار شبانه و هم نشت به‌ترتیب ۵۲/۸٪ و ۳۴/۵٪ نسبت به وضع موجود کاهش نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۹ سناریوی ۱ تأثیرگذارترین سناریو در کاهش نشت شبکه است.

۴- نتیجه‌گیری

در حال حاضر، یکی از چالش‌های جدی کشورهای درحال توسعه، توجه به حفظ منابع آب و بهره‌برداری بهینه از آن در کنار بهبود زیرساخت‌های توسعه است. موضوع نشت و کم کردن آن در شبکه‌های آبرسانی شهری از موضوعاتی است که در سالیان اخیر در بسیاری از کشورها از جمله ایران موردتوجه قرارگرفته و با برنامه‌ریزی‌های مدون علمی تجارب خوبی نیز به‌دست آمده است. خوشبختانه این امر مهم چند سالی است که در ایران نیز از آن استقبال شده و در قالب یک طرح ملی در شرکت‌های آبفا موردمطالعه قرارگرفته است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی اثربخشی مدیریت فشار بر کاهش نشت و درنتیجه کاهش هدررفت در شبکه‌های توزیع آب روستایی بوده است. برای این منظور، سناریوهای بهینه‌سازی فشار براساس کدهای ارتفاعی منطقه تعریف و شیرهای فشارشکن با فشار خروجی ثابت در نقاط مناسب بر اساس مرزهای شکل‌گرفته و توجه به توپوگرافی منطقه، دسترسی محلی و تأسیسات موجود جانمایی و تعبیه شدند.

در این تحقیق نشان داده شد که مدل‌سازی شبکه توزیع توانایی ایفای نقش یک راهنما و مشاور مجرب را برای بهره‌بردار دارا است. نتایج مدل به‌خوبی رفتار عادی شبکه توزیع منطقه مورد مطالعه را از منظر میزان فشار شبکه در ساعات مختلف شبانه‌روز ارائه داد؛ به‌طوری‌که حتی با مقایسه مقادیر مدل و مقادیر فشارسنجی شده در یک نقطه از روستا به‌وجود مصارف غیرمتعارف و انشعابات غیرمجاز پی‌برده شد. نتایج نشان می‌دهد که با اعمال سناریوها، متوسط فشار شبانه در شبکه توزیع روستا از ۳۲٪ تا حدود ۵۳٪ مقدار فعلی شبکه کاهش می‌یابد. این میزان کاهش متوسط فشار شبانه منجر به تغییر شاخص نشت زیرساخت از مقدار اولیه ۲۳/۱۸ به مقادیر ۱۳/۹۶، ۱۴/۸۳ و ۱۶/۵۸ شد. هم‌چنین این مقدار کاهش فشار، منجر به تغییرات نشت شبکه به‌میزان ۲۴/۲٪ تا ۳۴/۵٪ مقدار اولیه شده است. از بین سه سناریوی اعمال‌شده، اولین سناریو تا حدود زیاد و قابل‌قبولی انتظار را از حداقل و حداکثر فشار مجاز در شبکه نسبت به دو سناریو دیگر برآورده کرد. با اعمال این سناریو هدف رسیدن به فشار بهینه شبکه و کاهش حداکثری نشت و شاخص نشت زیرساخت نیز برآورده شد. در ادامه بعضی از محدودیت‌های موجود در این تحقیق و چند پیشنهاد برای پروژه‌های مرتبط بعدی ارائه می‌شود:

- با توجه به کمبود اطلاعات و عدم امکان نصب کنتور حجمی برخط در ورودی و خروجی مخزن روستا، برای محاسبه نوسانات ساعتی مصرف در ساعات مختلف شبانه‌روز از اطلاعات مندرج در جدول ۳-۱ نشریه ۳-۱۱۷ استفاده شده است. محاسبه دقیق این ضرایب برای شبکه‌های آب شرب روستایی می‌تواند به‌عنوان یک مطالعه مستقل درنظر گرفته شود؛
- هرچند در این تحقیق توان ثابت فشار (n) با ضریب اطمینان بالایی برابر با یک درنظر گرفته شده (Mays, 1997)؛ اما پیشنهاد می‌شود در پروژه‌های بعدی این توان برای شبکه‌های روستایی محاسبه شود؛
- در این تحقیق صرفاً از شیرهای فشارشکن با فشار خروجی ثابت برای مدیریت فشار شبکه استفاده شد. تأثیر دیگر شیرآلات کنترلی و هم‌چنین ترکیب این شیرآلات باهم در مسئله طرح مدیریت و کنترل فشار شبکه‌های توزیع آب می‌تواند در آینده بررسی شود.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- International Water Association
2- Surge Phenomenon
3- Average Zone Night Pressure
4- Leakage Index
5- U.K Water Research Institute

۶- مراجع

جعفری اصل، ج.، (۱۳۹۵)، "کنترل بهینه فشار درجهت حداقل‌سازی نشت در مدیریت سیستم‌های توزیع آب با

استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراکاوشی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه یاسوج، ایران.

حریری اصلی، ک.، حضوری علیپور، ا.، بازیار، س.، رحمانی‌راد، س.، و نظری، س.، (۱۳۹۵)، "مدیریت هوشمند و مدل‌سازی هیدرولیکی آب بدون درآمد"، *کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران*، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

ساقی، ح.، (۱۳۹۶)، "ارائه روشی نوین جهت تخمین میزان نشت در شبکه‌های آبرسانی با استفاده از تحلیل فشار گرهی"، *نشریه علوم آب و خاک*، ۲۱(۱)، ۱۲۷-۱۴۳.

سلطانی اصل، م.، و فغفور مغربی، م.، (۱۳۸۸)، "مدیریت هوشمند فشار به‌منظور کاهش نشت در شبکه‌های آبرسانی، مطالعه موردی: منطقه سرافرازان مشهد"، *نشریه آب و فاضلاب*، ۲۰(۳)، ۱۰۴-۹۹.

عطارزاده، ف.، حسین زاده، م.، پورنصیری، ز.، حمیدی مدنی، ح.، و پیرخواه کهن، م.، (۱۳۹۷)، "مقایسه دو الگوریتم فراابتکاری در کالیبراسیون شبکه توزیع آب"، *دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران*، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

ملاباشی، آ.، و شفیعی دستگردی، ا.، (۱۳۹۵)، "کاربرد مدیریت فشار در کاهش حوادث خط انتقال آب"، *کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران*، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، (۱۳۹۲)، *ضوابط طراحی سامانه‌های انتقال و توزیع آب روستایی و شهری*، نشریه شماره ۳-۱۱۷، بازنگری اول، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری و دفتر تهیه استانداردها و معیارهای فنی آب و آبفا، وزارت نیرو، تهران، ایران.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، (۱۳۹۱)، *راهنمای شناخت و بررسی عوامل موثر در آب به حساب نیامده و راهکارهای کاهش آن*، نشریه شماره ۵۵۶، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری و دفتر تهیه استانداردها و معیارهای فنی آب و آبفا، وزارت نیرو، تهران، ایران.

AbdelMeguid, H., Skworcow, P., and Ulanicki, B., (2011), "Mathematical modelling of a hydraulic controller for PRV flow modulation", *Journal of Hydroinformatics*, 13(3), 374-389.

Giustolisi, O., Savic, D., and Kapelan, Z., (2008), "Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks", *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(5), 626-635.

Lambert, A., (1997), "Pressure management/Leakage relationships: Theory, concepts and practical applications, minimizing leakage in water supply / distribution systems", *IQPC Seminar*, London.

Lambert, A., (2000), "What do we know about pressure: Leakage relationships in distribution systems?" *System approach to leakage control and water distribution systems management*, IWA, Brno, Czech Republic.

Mays, J., (1994), "Pressure dependent leakage", *World Water and Environmental Engineering*, October, WEF Publishing Inc.: London, UK.

Pilipovic, Z., and Taylor, R., (2003), "Pressure management in Waitakere City, New Zealand, A case study", *Water Supply*, 3(1-2), 135-141.

Thornton, J., and Lambert, A., (2005), "Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: Burst frequency and pressure: Consumption relationships", *Leakage 2005 Conference Proceedings*, Halifax, Canada.

Thornton, J., Sturm, R., and Kunkel, G., (2008), *Water loss control*, McGraw-Hill, Inc., New York.

Rossman, L.A., (2000), *EPANET user's manual,* US. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio: Drinking Water Research.

U.K. Water Industry, (1994), *Managing leakage reports A: Summary, E: Interpreting measured night flows, F: Using night flow data, G: Managing water pressure, J: Leakage management techniques, technology and training*, WRC plc/Water Service Association/Water Companies Association, Swindon, UK.

Walski, T., Chase, D.V., Savic, D.A., Grayman, W.M., and Beckwith, S., (2003), *Advanced water distribution modeling and management*, Haested Methods, Waterbury USA.