

ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب اهر بعد از بلندمرتبه‌سازی‌های مضاعف

مهدی دینی*

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

(دریافت: ۹۵/۶/۲، پذیرش: ۹۶/۲/۳۱، نشر آنلاین: ۹۶/۳/۱)

چکیده

هدف این مقاله تعیین تأثیر احداث ساختمان‌های بلندمرتبه، خارج از مقررات طرح جامع شهری، بر عملکرد هیدرولیکی شبکه توزیع آب اهر است. برای این منظور، ابتدا مدل EPANET و الگوریتم جامعه مورچگان در محیط Matlab با هم تلفیق شدند. سپس با کمینه کردن اختلاف فشار مشاهداتی و محاسباتی در گرهای شبکه، ضرایب همزن ویلیامز لوله‌های مدل شبکه تنظیم شد و بهترین مدل، برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه مورد استفاده قرار گرفت. برای مقایسه عملکرد هیدرولیکی شبکه از سه شاخص قابلیت اطمینان فازی، شاخص اطمینان‌پذیری فشار و شاخص اطمینان‌پذیری نیاز آبی استفاده شده است. مقایسه نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد که شبکه توزیع آب اهر بعد از ساخت و سازهای موجود از عملکرد مطلوبی برخوردار است هر چند چون شبکه توزیع آب اهر قبل از ساخت و سازها با مشکل کمبود فشار در برخی مناطق مواجه بوده است، ساخت و سازهای انجام شده، این مشکل را تقویت نموده است. اما هنوز خللی در عملکرد هیدرولیکی، اکثر مناطق شهری ایجاد نکرده است. در صورتی که برنامه ساخت و سازها به شکل گذشته خود و خارج از طرح‌های جامع شهری ادامه پیدا کنند به دلیل این که در کوچه و پس کوچه‌های شهر و در نقاط خاصی از شهر تمرکز یافته است، عملکرد هیدرولیکی شبکه را دچار مشکل خواهد نمود، به طوری که فشار در گر ۴۲ از ۳۱/۶ متر به ۲۱/۷ متر و مقدار منطقه‌ای شاخص قابلیت اطمینان فازی از ۰/۴۴ به ۰/۱۹ کاهش پیدا می‌کند.

کلیدواژه‌ها: ساختمان‌های بلندمرتبه، شبکه توزیع آب اهر، الگوریتم جامعه مورچگان، عملکرد هیدرولیکی، شاخص قابلیت اطمینان.

۱- مقدمه

دینی، (۱۳۹۴)؛ بهرام‌پور و مدیری، (۱۳۹۴))، توسعه نامتوازن شهرها (جنوبی، ۱۳۸۴) و فقدان روح و هویت شهری (مهرجو و آفریدی، ۱۳۸۹) را می‌توان در این زمینه نام برد. در سال‌های اخیر تقریباً تعداد ۱۳ ساختمان بلندمرتبه در شهر اهر احداث شده و به مرحله جذب جمعیت رسیده‌اند که تعداد طبقات آنها زیاد می‌باشد، با توجه به مستندات، ضوابط و مقررات طرح جامع شهری اهر در آنها رعایت نشده است. در حال حاضر در مورد مزایا و یا معایب و اثرات این ساخت و سازها از نظر اجتماعی اظهارات متفاوتی وجود دارد. از یک سو متولیان امر یعنی شهرداری و ساکنین شهر بر مزایای این قبیل ساخت و سازها پافشاری کرده و از سوی دیگر منتقدان خصوصاً همسایگان ساختمان‌های بلندمرتبه در مورد معایب آن نظرات متفاوتی دارند (دینی، ۱۳۹۴).

در این مطالعه هدف بررسی تأثیر این شکل ساخت و سازها بر روی عملکرد هیدرولیکی شبکه توزیع آب اهر می‌باشد. برای این منظور نیاز به ساخت مدل دقیق از شبکه توزیع آب اهر می‌باشد.

با توجه به رشد جمعیت و توسعه شهر اهر، در کوچه و پس‌کوچه‌های وسط شهر و بافت‌های قدیمی شهر به طور مرتب خانه‌های قدیمی تبدیل به ساختمان‌های بلندمرتبه می‌شوند که در بسیاری از آنها مقررات شهرسازی رعایت نمی‌شود. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که احداث ساختمان‌های بلندمرتبه با رعایت ضوابط و مقررات شهری در بهینه‌سازی مصرف سوخت (محمودی، ۱۳۸۱)؛ رحیمی و نورتقانی (۱۳۸۵)؛ فاضلی و حیدری، (۱۳۹۲)) توسعه پایدار ساخت و ساز در شهرها (سبحانی‌نژاد، ۱۳۸۴)؛ فرد و زعیمدار، (۱۳۸۷)؛ شریعتمداری و بنیانی، (۱۳۹۳))، هویت‌بخشی فضای شهری (نوریان و همکاران، ۱۳۸۷)؛ زینلی، (۱۳۹۴)) و سامان دادن به مشکل مسکن مؤثر می‌باشند. تردیدی نیست که اثرات احداث ساختمان‌های بلندمرتبه بدون رعایت ضوابط و قوانین شهری می‌تواند در ابعاد مختلف مورد تأمل و بررسی قرار گیرد. بروز مشکلات و معضلات زیست‌محیطی و شهری (امین‌زاده، ۱۳۸۱)؛ رهبر، (۱۳۸۱)،

مشخصات فوق، هر کدام از آنها را به یک عنوان یک مصرف کننده جدید به شبکه اضافه کرده و عملکرد هیدرولیکی و کارایی هیدرولیکی شبکه بررسی شده است. برای این منظور ابتدا یک مدل هیدرولیکی کالیبره شده از شبکه توزیع آب اهر تهیه گردید و مدل کالیبره شده برای ارزیابی عملکرد شبکه در وضعیت قبل از ساخت و سازها، وضعیت موجود (بعد از ساخت و سازها) و وضعیت آتی (توسعه ساخت و سازها در قسمت‌های مرکزی شهر) به کار گرفته شد. ارزیابی تأثیر بلندمرتبه سازی‌های مضاعف بر عملکرد شبکه‌های توزیع آب و پرداختن به این موضوع در یک شبکه واقعی از نوآوری‌های تحقیق به حساب می‌آید.

۳- مواد و روش‌ها

برای کالیبراسیون هیدرولیکی شبکه توزیع آب اهر، از تلفیق مدل شبیه‌ساز EPANET (Rossman, ۲۰۰۰) و الگوریتم بهینه‌ساز جامعه مورچگان در محیط Matlab استفاده شده است. الگوریتم جامعه مورچه‌ها توسط Dorigo و همکاران (۱۹۹۶)، پیشنهاد شده است. تابع احتمال تعریف شده برای این روش به صورت رابطه (۱) می‌باشد.

$$P_{i,j}(k, t) = \frac{[T_{i,j}(t)]^\alpha [U_{i,j}(t)]^\beta}{\sum_{j=1}^J [T_{i,j}(t)]^\alpha [U_{i,j}(t)]^\beta} \quad (1)$$

که $P_{i,j}(k, t)$ احتمال انتخاب گزینه j وقتی که مورچه k در دوره t و نقطه تصمیم i قرار دارد، $T_{i,j}(t)$ غلظت فرومون مسیر ij در دوره t ، $U_{i,j}(t)$ هدایت کننده کاوشی مسیر ij و α, β مقادیر ضرایب وزن فرومون و هدایت کننده کاوشی می‌باشند. j تعداد مسیرهای انتخابی توسط مورچه k هنگامی که در نقطه تصمیم‌گیری i قرار دارد. رابطه بهنگام‌سازی فرومون به صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$T_{i,j}(t+1) = \rho T_{i,j}(t) + \Delta T_{i,j}(t) \quad (2)$$

که ρ ضریب تبخیر فرومون، $T_{i,j}(t)$ غلظت فرومون مسیر ij در دوره t ، $T_{i,j}(t+1)$ غلظت فرومون مسیر ij در دوره $(t+1)$ و $\Delta T_{i,j}(t)$ اضافه فرومون مسیر ij در دوره t می‌باشند. تابع هدف مدل به صورت رابطه (۳) می‌باشد (دینی و تابش ۲۰۱۳).

$$F = \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T (PO_{tj} - PS_{tj})^2 \quad (3)$$

که در آن N تعداد گره‌های نمونه برداری از شبکه و T کل ساعت-های نمونه‌برداری از شبکه، PO_{tj} فشار مشاهداتی و PS_{tj} فشار محاسباتی در گره j ام در زمان t و F مقدار تابع هدف می‌باشد. برای بررسی بهتر عملکرد هیدرولیکی شبکه توزیع آب از شاخص

به طوری که در آن تطبیق خوبی بین نتایج حاصل از مدل‌سازی با وضعیت واقعی سیستم وجود داشته باشد. برای دستیابی به این هدف لازم است مدل توسط داده‌های میدانی کالیبره شود و مدل کالیبره شده در شرایط مختلف قبل و بعد از ساخت و سازها مدل گردیده و مورد مقایسه قرار گیرد. محققین زیادی، توابع هدف مختلفی در زمینه بهینه‌سازی فرایند کالیبراسیون هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب ارائه نموده‌اند. Ormsbee (۱۹۸۹)، حداقل‌سازی خطای بین فشار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در گره‌های شبکه و Borzi و همکاران (۲۰۰۵)، حداقل‌سازی مجموع اختلاف فشار و دبی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در گره‌ها و لوله‌های شبکه و Yu و همکاران (۲۰۰۹)، حداقل‌سازی مجموع اختلاف فشار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در گره‌ها و دبی در لوله‌ها و تراز در تانک‌ها را به عنوان تابع هدف در نظر گرفتند. Dini و Tabesh (۲۰۱۳)، با بکارگیری الگوریتم مورچگان و تقسیم تابع هدف برزی و همکاران به دو تابع هدف مجزا شامل حداقل‌سازی اختلاف فشار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در گره‌ها و حداقل‌سازی اختلاف دبی جریان مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در لوله‌ها، روشی جدید برای کالیبراسیون هیدرولیکی شبکه مطرح کردند که در آن سرعت رسیدن به جواب نهایی نسبت به سایر توابع هدف افزایش می‌یابد. Tabesh و همکاران (۲۰۱۱)، با تلفیق نمودن مدل‌های تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا و مبتنی بر فشار با مدل بهینه‌ساز و با به کارگیری تابع هدف به تنظیم پارامترهای مدل در چهار وضعیت مصرف نرمال، حداکثر، حداقل و شرایط جریان آتش‌نشانی پرداخته‌اند. آنان نتیجه گرفتند که برای تنظیم ضریب زبری استفاده از داده‌های مصرف جریان آتش‌نشانی یا حداکثر مصرف روزانه منجر به دقت بیشتری در نتایج کالیبراسیون مدل تحلیل هیدرولیکی می‌شود. که در این تحقیق نیز کالیبراسیون شبکه در حالت حداکثر مصرف از شبکه انجام می‌شود. تحقیقاتی که مستقیماً تأثیر ساخت و سازها بر عملکرد شبکه‌های آبرسانی شهری را مطالعه کرده باشد، وجود ندارد و در این ارتباط تنها می‌توان به تحقیقی اشاره کرد که به موضوع تأثیر نوسانات مصرف در عملکرد شبکه‌های آبرسانی شهری پرداخته‌اند (مرادی و همکاران، ۱۳۸۸).

اخیراً بحث فوق در قالب یک مثال فرضی بر روی شبکه توزیع آب منطقه بروشی شهر برنفرود امریکا مدل شده و مشخص شده است که بلندمرتبه سازی‌های محدود، تأثیر زیادی در عملکرد هیدرولیکی شبکه ندارد (دینی و عزیزی، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۳). هدف این مقاله بررسی تأثیر احداث ساختمان‌های بلندمرتبه، بدون رعایت ضوابط و مقررات شهری، بر عملکرد هیدرولیکی شبکه توزیع آب اهر است. در این راستا برای این که مشخص شود که این شکل ساخت و سازها چه میزان تعادل توزیع آب در شهرها را دچار تغییر می‌کنند. بعد از تعیین موقعیت ساختمان‌ها با

که در آن $H_{j,t}$ فشار موجود در گره j ام در لحظه t ، H^d حداقل فشار مورد نیاز، H^m حداکثر فشار مجاز در شبکه، Q_j^r دبی مورد نیاز گره j ام، NN تعداد گره‌های شبکه و t ساعت‌های اندازه‌گیری در طول شبانه روز می‌باشد. شاخص‌های فوق با تهیه Mfile در محیط MATLAB محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. پارامترهای قابل تنظیم مدل کالیبراسیون ساخته شده، شامل U_0 ، β ، T_0 ، α ، ρ و $\Delta T_{i,j}(t)$ و Nant تعداد مورچه‌ها در هر گام حل و Ncyc تعداد چرخه‌ها در هر گام زمانی حل می‌باشد. تنظیم پارامترهای مدل با استفاده از تحلیل حساسیت پارامترهای مدل برای یک شبکه دو حلقه‌ای انجام شده است به عبارتی با فرض معلوم بودن مقادیر فشارگرهی در برخی گره‌های شبکه دو حلقه‌ای، پارامترهای مدل طوری تنظیم گردیده‌اند که مدل کالیبراسیون جواب نهایی را در سریع‌ترین زمان و با دقت بالا محاسبه نماید، نتایج تحلیل حساسیت در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- جمع‌بندی نتایج پارامترهای مدل کالیبراسیون بعد از تحلیل حساسیت

پارامتر	U_0	β	T_0	α	ρ	$\Delta T_{i,j}(t)$	N_{cyc}	N_{ant}
مقدار	۱	۱	۴۰	۱	۰/۹۸	۱	۱۰	۱۰۰

۴- مطالعه موردی

برای بررسی تأثیر بلندمرتبه سازی‌های مضاعف بر روی شبکه توزیع آب شهری از شبکه توزیع آب شهر اهر به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است. شهر اهر در استان آذربایجان شرقی و در ۹۰ کیلومتری تبریز واقع شده است. در شکل (۲)، موقعیت استان آذربایجان شرقی و شهر اهر نشان داده شده است این شهر دارای بافت قدیمی است و اکثر ساختمان‌های موجود در آن یک یا دو طبقه بوده و در قسمت‌های خاصی از شهر تعداد طبقات ساختمان‌ها حداکثر ۴ می‌باشد در سال‌های اخیر به یکباره مجوز ساخت ساختمان‌های بلندمرتبه تا ۱۲ طبقه صادر گردیده است که با توجه به مستندات، ضوابط و مقررات طرح جامع شهری اهر در آنها رعایت نشده است. تمامی ساختمان‌های بلندمرتبه در قسمت مرکزی و غربی شهر ساخته شده‌اند. در شکل (۳)، موقعیت تقریبی این ساختمان‌ها نشان داده شده است که در مجموع در حدود ۱۳ ساختمان می‌باشد. ساخت این ساختمان‌ها، تقاضای مورد نیاز گره‌های شبکه را تغییر داده است.

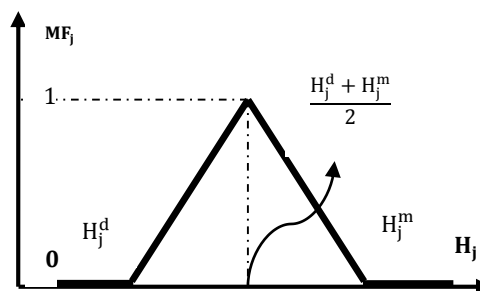
قابلیت اطمینان فازی (FRI)، شاخص اطمینان‌پذیری فشار (HBNP) و شاخص اطمینان‌پذیری نیاز آبی (HBSD) استفاده شده است. قاجارنیا (۱۳۸۸)، شاخص اطمینان‌پذیری فازی را با رابطه زیر تعریف کرده است.

$$FRI_j = MF_j \times C_j^1 \times C_j^2$$

$$C_j^1 = 1 - \frac{Q_j^r}{\sum_{j=1}^{NN} Q_j^r}$$

$$C_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^{NP_j} D_{ij}}{NP_j \times D_{m_j}}$$
(۴)

که MF_j مقدار درجه عضویت تابع مورد نظر برای گره j ام، C_j^1 ضریب نیاز آبی گره j ام جهت لحاظ نمودن اهمیت گره‌های پر مصرف، Q_j^r دبی مورد نیاز گره j ام و C_j^2 شاخص یکنواختی قطر لوله‌های متصل به گره j ام، D_{ij} قطر لوله i ام که به گره j ام متصل است، NP_j تعداد لوله‌های متصل به گره j ام و D_{m_j} قطر قطورترین لوله متصل به گره j ام است. از نظر محققین گرهی مطمئن‌تر است که تمامی لوله‌های متصل به آن دارای قطر یکسان باشند (Prasad و Park، ۲۰۰۴). تابع عضویت فازی به کار رفته در این تحقیق به صورت شکل (۱) می‌باشد. مقادیر بالای شاخص مربوط به گره‌های است که فشار در آنها نزدیک به مقدار میانگین حداکثر فشار مجاز و حداقل فشار مورد نیاز باشد.



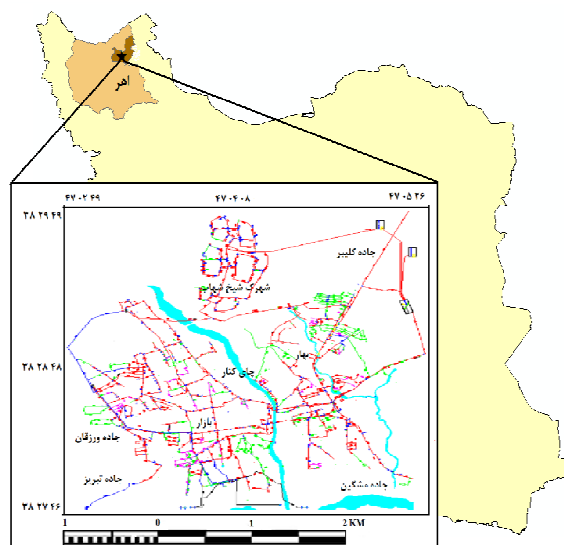
شکل ۱- تابع عضویت شاخص قابلیت اطمینان فازی

شاخص اطمینان‌پذیری فشار و شاخص اطمینان‌پذیری نیاز آبی توسط Carrijo و همکاران (۲۰۰۴)، ارائه شده است و از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید. بیشینه نمودن شاخص اطمینان‌پذیری نیاز آبی در کل شبکه باعث افزایش فشار موجود در گره‌هایی می‌شود که در تأمین نیاز آبی کل شبکه سهم بیشتری دارند.

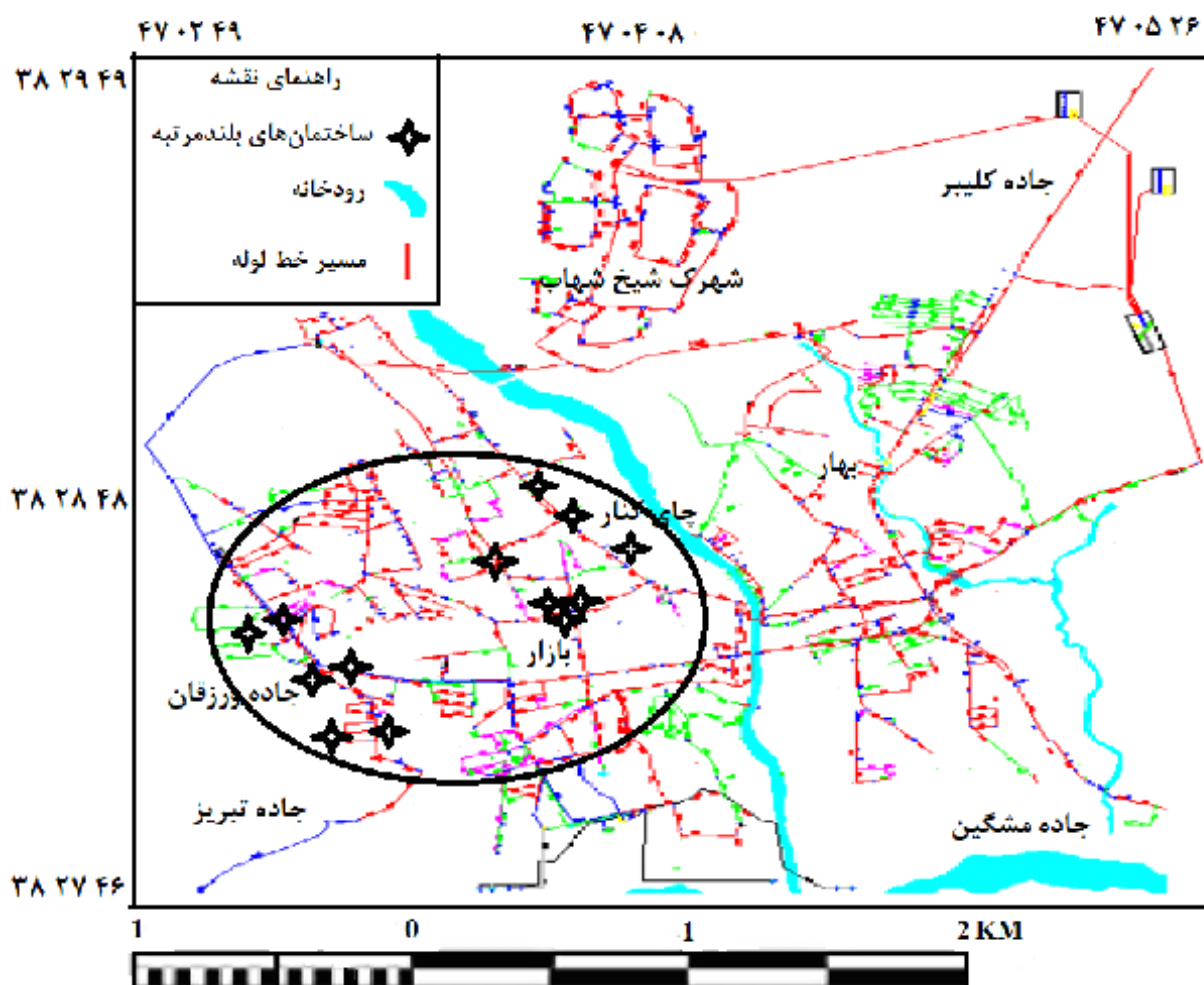
$$HBNP = \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^{NN} \left(\frac{H_{j,t} - H^d}{H_t^m - H^d} \right)^{0.5} \quad H^d \leq H_{j,t} \leq H_t^m$$
(۵)

$$HBSD = \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^{NN} \left[\left(\frac{H_{j,t} - H^d}{H_t^m - H^d} \right)^{0.5} * \frac{Q_{j,t}^r}{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^r} \right]$$
(۶)

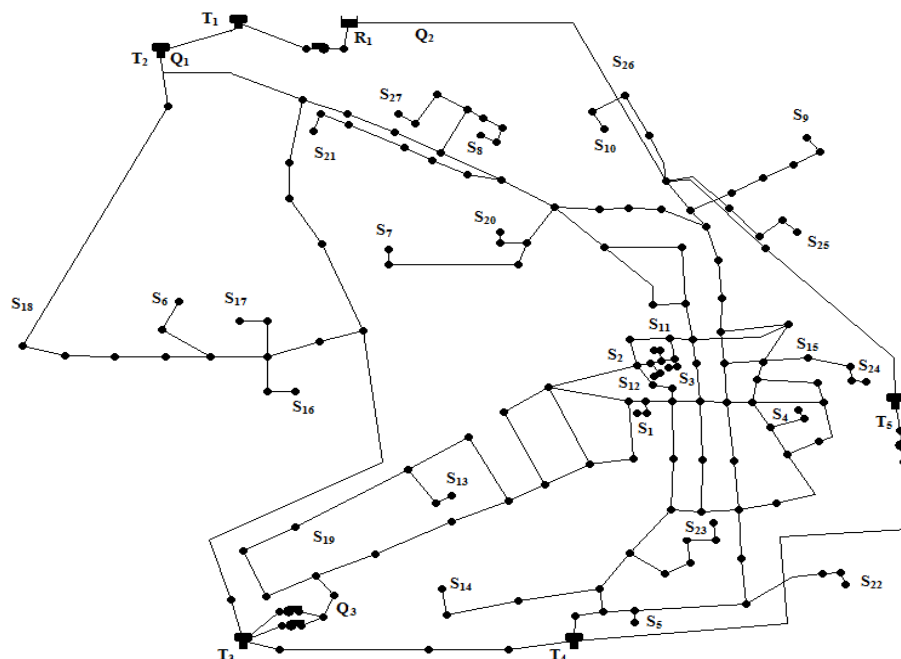
برای بررسی تأثیر این تغییرات بر روی عملکرد هیدرولیکی شبکه توزیع آب اهر، ساختار ساده شده شبکه با لوله‌ها و گره‌های اصلی به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردیده که شامل ۱۹۲ لوله، ۱۶۹ گره و یک مخزن، پنج تانک و سه ایستگاه پمپاژ در شکل (۴) با چرخش ۹۰ درجه‌ای در خلاف جهت عقربه‌های ساعت نسبت به شکل (۳) نشان داده شده است که اطلاعات مربوط به مشخصات آنها از شرکت آب و فاضلاب شهر اهر تهیه گردیده و تقاضای تخمینی گره‌ها در شرایط مصرف نرمال به صورت یکنواخت توزیع شده است. برای اعمال تغییرات مربوط به مصارف ساختمان‌های جدید یکی از ساختمان‌های ساخته شده که دارای ۴۰ واحد مسکونی بود، مینا قرار گرفت با فرض این که در هر واحد مسکونی به طور متوسط ۵ نفر ساکن شود با توجه به متوسط مصرف سرانه آب در شهر اهر که در حدود ۲۱۰ لیتر بر نفر در روز می‌باشد. در این حالت با ساخت یکی از ساختمان‌های فوق، حدود ۰/۵ لیتر بر ثانیه بر مصرف شبکه اضافه خواهد شد.



شکل ۲- نقشه موقعیت جغرافیایی استان آذربایجان شرقی و شهر اهر



شکل ۳- موقعیت تقریبی ساختمان‌های بلندمرتبه در شهر و منطقه مورد مطالعه



شکل ۴- جانمایی شبکه توزیع آب اهر و شماره لوله‌ها، گره‌ها و مخازن شبکه

به شرایط توزیع آب در تصفیه‌خانه آب اهر به صورت یکنواخت توزیع گردید. از بین مقادیر مشاهده‌ای نیز تنها مقادیر فشار گرهی در تعدادی از گره‌های شبکه در ساعت پیک مصرف مورد استفاده قرار گرفت. لذا در ابتدا و در بحث کالیبراسیون شبکه توزیع آب اهر، ضرایب Hazen-Williams شبکه بر اساس مقادیر فشار گرهی در زمان حداکثر مصرف از شبکه انجام گردید. علت انتخاب زمان حداکثر مصرف بر اساس سوابق مطالعات قبلی می‌باشد که نتیجه گرفتند که برای تنظیم ضریب زبری استفاده از حداکثر مصرف روزانه منجر به دقت بیشتری در نتایج کالیبراسیون مدل تحلیل هیدرولیکی می‌شود. در جدول (۲) فشار مشاهداتی در تعدادی از گره‌های شبکه توزیع آب اهر در زمان حداکثر مصرف نشان داده شده است. علامت ستاره به معنی عدم قرائت درست در گره‌ها می‌باشد که در مرحله کالیبراسیون از بین داده‌ها حذف شده است. همچنین از بین ایستگاه‌های فشارسنجی موجود، ایستگاه‌های S_3 و S_7 برای صحت‌سنجی (داده‌های تست) و سایر ایستگاه‌های برای ساخت مدل کالیبراسیون (داده‌های آموزش) مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به این که تعداد لوله‌های شبکه و در نتیجه تعداد پارامترهای کالیبراسیون در مقایسه با تعداد گره‌های اندازه‌گیری شده بسیار زیاد می‌باشد. کالیبراسیون به دو صورت بدون دسته‌بندی و با دسته‌بندی پارامترها انجام شده است در حالت بدون دسته‌بندی به تعداد لوله‌های شبکه، پارامترهای کالیبراسیون از C_1 تا C_{192} وجود خواهد داشت و در حالت دسته‌بندی پارامترها، سه قالب دسته‌بندی به صورت جدول (۳) در نظر گرفته شده است.

در شکل (۴)، R_1 مخزن موجود در محل تصفیه‌خانه اهر با ظرفیت ۵۰۰۰ متر مکعب می‌باشد که تنها منبع تأمین آب شهر به حساب می‌آید. T_1 تا T_5 به ترتیب تانک‌های ذخیره آب موجود در شهر Q_1 ، Q_2 و Q_3 موقعیت اندازه‌گیری دبی آب ورودی به شبکه شهر را نشان می‌دهد همچنین S_1 تا S_{27} مکان‌های نمونه‌برداری مقادیر فشار را نشان می‌دهد. مقادیر فشار و دبی جریان در لوله‌ها با نصب تجهیزات فشارسنجی و دبی‌سنجی در گره‌ها و لوله‌های شبکه اندازه‌گیری شده است.

۵- نتایج و بحث

برای مطالعه تأثیر ساخت و سازهای خارج از طرح‌های جامع و توسعه شهری بر شبکه توزیع آب اهر، سه حالت شامل وضعیت قبل از ساخت و سازها، وضعیت موجود (بعد از ساخت و سازهای فعلی) و وضعیت آتی (توسعه ساخت و سازها در قسمت‌های مرکزی شهر در آینده) در نظر گرفته شد و مدل‌سازی در شرایط حداکثر مصرف، از شبکه انجام شده است که در آن بر اساس نتایج تحقیقات موجود (Dini و Tabesh، ۲۰۱۴) ضریب الگوی مصرف برابر $1/54$ می‌باشد. از موضوعات بسیار مهم در مدل‌سازی، تطبیق نتایج حاصل از مدل‌سازی با وضعیت واقعی سیستم می‌باشد. برای دستیابی به این هدف لازم است مدل توسط داده‌های میدانی کالیبره شود. پارامترهای کالیبراسیون مدل شبکه توزیع آب شامل ضرایب زبری لوله‌ها و نیاز آبی گره‌ها می‌باشند. مقادیر مشاهده‌ای نیز عمدتاً شامل فشار گرهی، تراز تانک‌ها و مقدار جریان در لوله‌ها می‌باشد. از بین پارامترهای کالیبراسیون، نیازهای گرهی با توجه

جدول ۲- فشار مشاهداتی در برخی گره‌های شبکه آب اهر

ردیف	محل فشارسنجی	فشار مشاهده‌ای (متر)
۱	S ₁	*
۲	S ₂	۴۴/۳
۳	S ₃	۴۲/۸
۴	S ₄	۳۲/۵
۵	S ₅	۱۸/۱
۶	S ₆	۲۹/۳
۷	S ₇	۲۵/۹
۸	S ₈	۱۸/۸
۹	S ₉	۴۲/۶
۱۰	S ₁₀	۱۵/۴
۱۱	S ₁₁	*
۱۲	S ₁₂	۴۲/۲
۱۳	S ₁₃	۳۱/۳
۱۴	S ₁₄	۱۰/۳
۱۵	S ₁₅	*
۱۶	S ₁₆	۳۰/۳
۱۷	S ₁₇	۳۵/۳
۱۸	S ₁₈	*
۱۹	S ₁₉	*
۲۰	S ₂₀	۴۸/۱
۲۱	S ₂₁	۲۰/۸
۲۲	S ₂₂	۴۶/۱
۲۳	S ₂₃	۳۱/۹
۲۴	S ₂₄	۲۰/۹
۲۵	S ₂₅	۱۷/۴
۲۶	S ₂₆	*
۲۷	S ₂₇	۲۲/۳

اجتناب از این مسئله مدل با کمترین خطای داده‌های تست یعنی مدل با تعداد شش دسته برای ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب اهر بعد از بلندمرتبه‌سازی‌های مضاعف مورد استفاده قرار گرفت.

بعد از کالیبراسیون مدل شبکه توزیع آب اهر در وضعیت قبل از ساخت و سازها، به بررسی عملکرد هیدرولیکی شبکه در شرایط مختلف پرداخته شد. نتایج اجرای مدل شبکه توزیع آب اهر در وضعیت قبل از ساخت و سازها و در شرایط حداکثر مصرف از شبکه در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طوری که معلوم است در وضعیت قبل از ساخت و سازها برخی نقاط شبکه دارای کمبود فشار می‌باشند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مناطقی از شهر که جزء نقاط مرتفع شهر هستند، به دلیل ارتفاع بالای گره‌های شبکه در آن مناطق دچار کمبود فشار می‌باشند. مقادیر کمبود فشار بر اساس حداکثر چهار طبقه و برابر ۲۶ متر در نظر گرفته شده است. بیشترین فشار گرهی در شبکه مربوط به مناطق هم‌جوار رودخانه شهر (چای‌کنار) می‌باشد که از مناطق کم ارتفاع شهر می‌باشد. مقادیر حداکثر فشار در شبکه بر اساس پیشنهاد نشریه ۳-۱۱۷ برابر ۵۰ متر در نظر گرفته شده است. برای بررسی کارایی هیدرولیکی شبکه در این وضعیت، Mfile تهیه شده در محیط مطلب اجرا گردید که نتایج آن در جدول (۵) به صورت شاخص قابلیت اطمینان فازی، شاخص اطمینان‌پذیری فشار و شاخص اطمینان‌پذیری نیاز آبی برای گره‌ها، منطقه مورد مطالعه و کل شبکه داده شده است. همچنین در این جدول فشار و نیاز آبی لحظه‌ای برخی گره‌های شبکه نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که در این شرایط شاخص قابلیت اطمینان فازی کل شبکه ۰/۳۱، شاخص اطمینان‌پذیری فشار ۰/۴۱ و شاخص اطمینان‌پذیری نیاز آبی ۰/۱۶ می‌باشد. مقادیر منطقه‌ای شاخص قابلیت اطمینان فازی ۰/۴۴ و شاخص اطمینان‌پذیری فشار ۰/۴۵ می‌باشد. پایین بودن مقادیر شاخص قابلیت اطمینان کل شبکه و شاخص قابلیت اطمینان منطقه‌ای نشان دهنده این است که شبکه در وضعیت قبل از ساخت و سازها با مقادیر فشار پایین و نزدیک به حداقل فشار مورد نیاز در برخی مناطق شهری و با مقادیر فشار بالا و نزدیک به مقادیر حداکثر فشار در برخی مناطق دیگر کار می‌کند. همچنین مطابق شکل (۵) در برخی گره‌های شبکه تخطی از مقادیر حداقل فشار وجود دارد که در آنها مقادیر شاخص‌های قابلیت اطمینان گرهی برابر صفر می‌باشد به عبارتی در آن گره‌ها همه نیاز آبی به صورت کامل تأمین نمی‌شود. در وضعیت موجود در تعدادی از ساخت و سازها انجام شده، طرح‌های جامع شهری رعایت نشده است بر اساس موقعیت تقریبی ساختمان‌ها که در شکل (۲) نشان داده شده است، مصارف تغییر یافته برای گره‌های شبکه تعریف و مجدداً مدل شبکه توزیع آب اهر اجرا گردید که در جدول (۶) نتایج قابلیت اطمینان هیدرولیکی شبکه در زمان حداکثر مصرف نشان داده شده است.

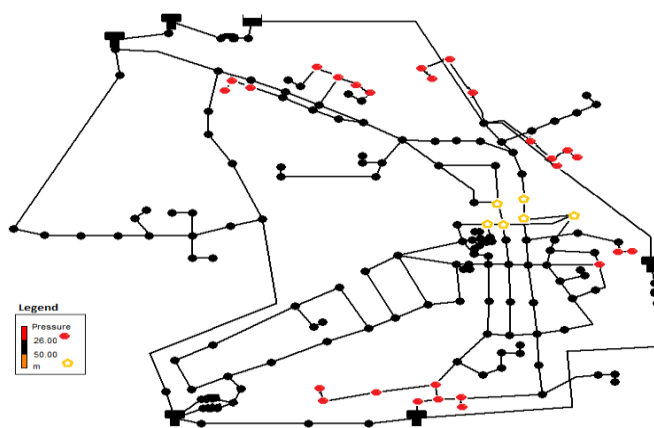
در دسته‌بندی اول همه لوله‌ها به یک دسته (C_1) و در دسته‌بندی دوم و سوم لوله‌ها بر اساس قطرشان به ۳ دسته و ۶ دسته مجزا تقسیم شدند بدینوسیله پارامترهای تنظیمی به ترتیب به ۳ پارامتر (C_1 تا C_3) و ۶ پارامتر (C_1 تا C_6) کاهش یافت. در نهایت همه مدل‌های فوق ۵ بار متوالی اجرا شدند و بهترین مقدار برای تابع هدف، به عنوان مقدار بهینه مدل کالیبراسیون و مقادیر به دست آمده برای ضرایب کالیبراسیون (ضرایب Hazen-Williams) به عنوان مقادیر تنظیمی در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به مقادیر تنظیمی و مقدار تابع هدف متناظر با آنها در حالت‌های مختلف در جدول (۴) نشان داده شده است. بدین ترتیب بر اساس خطای داده‌های آموزش مدل با مدل بدون دسته‌بندی لوله‌ها به عنوان بهترین مدل و براساس خطای داده‌های تست مدل با تعداد دسته‌بندی برابر شش به عنوان بهترین مدل می‌باشد. در مجموع با این که مدل بدون دسته‌بندی لوله‌ها دارای خطای آموزش بسیار پایینی نسبت به مدل با دسته‌بندی لوله‌ها است ولی خطای آموزش بیشتری نسبت به آنها دارد که این مسئله می‌تواند ناشی از این باشد که همگرا شدن بیش از اندازه مدل کالیبراسیون به سمت داده‌های آموزش، مدل را از داده‌های تست دور می‌کند و خطای واقعی مدل‌سازی را افزایش می‌دهد. برای

جدول ۳- نحوه دسته‌بندی لوله‌های شبکه توزیع آب اهر به تعداد دسته‌های محدود

دسته‌بندی سوم		دسته‌بندی دوم		دسته‌بندی اول	
شماره لوله‌ها	پارامتر	شماره لوله‌ها	پارامتر	لوله‌ها	پارامتر
(D < 100mm)	C1	(D <= 100mm)	C1	تمام لوله‌های شبکه	C1
۱۲۸-۱۲۷-۱۲۹-۱۳۱-۱۳۰-۱۲۶-۱۱۹-۱۰۴-۴۲۳-۱۲۵-۱۲۴-۱۴۰-۱۲۸-۱۴۱-۱۴۹-۱۴۵-۱۳۷-۱۳۲-۱۳۳-۱۳۴-۱۳۵-۱۳۶-۹۸-۹۹-۱۱۶-۱۰۰-۱۵۲-۱۵۵-۱۵۸-۱۵۱-۸-۱۱۸-۵۴-۱۰۱-۹۷-۹۸-۹۹-۱۱۶-۱۰۰-۱۵۲-۱۵۵-۱۵۸-۱۵۱-۸-۱۱۸-۵۴-۱۰۱-۹۷-۹۶-۹۲-۱۷۷-۱۶۵-۱۴-۸۰-۱۱-۷۹-۱۱۷-۱۱۲-۱۱۱-۱۱۵-۱۰۳-۱۸۵-۱۶۸-۱۵۹-۱۸۶-۱۹۲-۱۴-۸۰-۱۱-۷۹-۱۱۷-۱۱۲-۱۱۱-۱۱۵-۱۰۳-۱۸۵-۱۶۸-۱۵۹-۱۸۶-۱۹۲-۱۹۱-۱۸۷-۱۵۴-۴-۵-۶-۱۴۷-۱۵۳-۱۵۰-۱۴۸-۵۸-۵۷					
(D = ۱۰۰ mm)					
(D = ۱۵۰ mm)	C2	(۱۰۰ mm < D <= ۲۰۰ mm)	C2		
۱۱۳-۵۵-۱۱۴-۵۲-۵۶-۳۰-۲۹-۱۷۰-۱۰۵-۴۷-۷-۱۳۹-۱۴۷-۴۵-۴۸-۱۶۲-۲۱-۱۵-۹-۵۰-۷۱-۲۸-۷۰-۶۲-۷۷-۲۲-۶۶-۶۵-۶۴-۱۹۰-۶۸-۶۷					
(D = ۲۰۰ mm)	C3	(۲۰۰ mm < D)	C3		
۱۶۴-۱۶۳-۷۵-۱۶۵-۳۶-۳۵-۶۹-۳۷-۷۳-۷۴-۱۹۰-۱۶۶-۹۵-۹۳-۸۳-۲۴-۱۸۹-۱۸۸-۹۱-۸۴-۸۱-۸۲-۱۶۷					
(D = ۳۰۰ mm)	C4	C4	C4		
۳۱-۴۰-۱۸۳-۱۸۲-۲۷-۲۳-۱-۴۳-۴۴-۳۴-۴۱-۴۲-۱۷۷-۱۷۸-۱۷۹-۱۷۶-۱۶۱-۱۶۰-۱۸۰-۱۵۶-۳۸-۳۹-۱۵۷-۳۲-۱۸۱-۵۹-۱۰۸-۱۰۹-۲۳-۱۰۷-۶۱-۶۳-۸۵-۷۶-۷۸-۸۶-۸۷-۸۸-۱۱۰-۱۲-۴۹-۱۰۰-۱۷-۱۶-۱۳-۱۴۳-۱۴۴-۲-۴۶-۳-۱۴۲-۱۸-۵۱-۱۲۰-۲۲-۵۲-۱۲۲					
(۳۰۰ mm < D)					
۱۸۴-۱۷۵-۱۰۲-۱۷۴-۱۷۲-۱۰۶-۱۲۱-۱۷۳	C5	C5	C5		
۳۱-۴۰-۱۸۳-۱۸۲-۲۷-۲۳-۱-۴۳-۴۴-۳۴-۴۱-۴۲-۱۷۷-۱۷۸-۱۷۹-۱۷۶-۱۶۱-۱۶۰-۱۸۰-۱۵۶-۳۸-۳۹-۱۵۷-۳۲-۱۸۱-۵۹-۱۰۸-۱۰۹-۲۳-۱۰۷-۶۱-۶۳-۸۵-۷۶-۷۸-۸۶-۸۷-۸۸-۱۱۰-۱۲-۴۹-۱۰۰-۱۷-۱۶-۱۳-۱۴۳-۱۴۴-۲-۴۶-۳-۱۴۲-۱۸-۵۱-۱۲۰-۲۲-۵۲-۱۲۲					
۳-۱۴۲-۱۸-۵۱-۱۲۰-۲۲-۵۲-۱۲۲-۱۸۴-۱۷۵-۱۰۲-۱۷۴-۱۷۲-۱۰۶-۱۲۱-۱۷۳					
۱۸۴-۱۷۵-۱۰۲-۱۷۴-۱۷۲-۱۰۶-۱۲۱-۱۷۳	C6	C6	C6		
۳-۱۴۲-۱۸-۵۱-۱۲۰-۲۲-۵۲-۱۲۲-۱۸۴-۱۷۵-۱۰۲-۱۷۴-۱۷۲-۱۰۶-۱۲۱-۱۷۳					
۱۰۶-۱۲۱-۱۷۳					

جدول ۴- نتایج مقادیر تنظیمی و مقدار تابع هدف مدل کالیبراسیون شبکه توزیع آب اهر

دسته‌بندی اول		دسته‌بندی دوم		دسته‌بندی سوم		بدون دسته‌بندی	
پارامتر	مقدار تنظیمی	پارامتر	مقدار تنظیمی	پارامتر	مقدار تنظیمی	پارامتر	مقدار تنظیمی
C1	۸۶	C1	۸۳	C1	۷۰	C1	۱۲۸
		C2		C2	۸۴	C2	۷۷
		C3	۸۰	C3	۱۰۴	C3	۱۴۰
		C4		C4	۷۷
		C5	۹۴	C5	۹۱	C191	۱۰۳
		C6		C6	۱۵۰	C192	۱۱۹
خطای داده‌های آموزش							
	۲۳۳/۶		۲۲۵		۱۷۷/۳		۳۰/۵
خطای داده‌های تست							
	۱۷/۹		۱۳/۲		۱۲/۶		۱۵/۲



شکل ۶- توزیع فشار در گره‌های شبکه در وضعیت قبل از ساخت و سازها

جدول ۵- مقادیر قابلیت اطمینان گرهی، منطقه‌ای و کل شبکه در شبکه اهر در وضعیت قبل از ساخت و ساز

گره	فشار گرهی	تقاضای گرهی	FRI	HBNP	HBSB
۳۶	۱۶/۱	۱/۲۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰
۳۷	۳۶/۴	۴/۳۳	۰/۷۲	۰/۶۶	۰/۰۰۲
۳۸	۴۱/۶	۴/۸۷	۰/۵۰	۰/۸۱	۰/۰۰۳
۳۹	۳۷/۵	۲/۹۳	۰/۹۵	۰/۶۹	۰/۰۰۲
۴۰	۳۶/۹	۳/۴۷	۰/۸۳	۰/۶۷	۰/۰۰۲
۴۱	۲۸/۰	۳/۶۷	۰/۱۵	۰/۲۹	۰/۰۰۱
۴۲	۳۱/۶	۲/۱۳	۰/۴۷	۰/۴۸	۰/۰۰۱
۴۳	۳۴/۴	۱/۶۰	۰/۵۴	۰/۵۹	۰/۰۰۱
۴۴	۳۴/۴	۳/۳۳	۰/۵۸	۰/۵۹	۰/۰۰۲
۴۵	۳۷/۲	۱/۶۶	۰/۹۳	۰/۶۸	۰/۰۰۱
۴۶	۴۳/۹	۶/۴۵	۰/۴۶	۰/۸۶	۰/۰۰۵
۴۷	۳۴/۴	۵/۹۳	۰/۶۴	۰/۵۹	۰/۰۰۳
۴۸	۴۱/۳	۲/۰۶	۰/۷۳	۰/۸۰	۰/۰۰۱
۴۹	۳۴/۳	۶/۱۹	۰/۵۲	۰/۵۹	۰/۰۰۳
۹۳	۱۶/۵	۰/۷۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰
۹۴	۲۸/۹	۲/۳۳	۰/۲۴	۰/۳۵	۰/۰۰۱
۹۵	۳۳/۴	۱/۴۰	۰/۵۸	۰/۵۶	۰/۰۰۱
۹۶	۳۷/۲	۲/۱۳	۰/۹۳	۰/۶۸	۰/۰۰۱
۹۷	۳۷/۵	۲/۱۳	۰/۹۶	۰/۶۹	۰/۰۰۱
۱۰۱	۱۱/۷	۱/۲۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰
۱۰۲	۱۷/۴	۲/۴۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰
۱۰۳	۱۶/۹	۱/۸۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰
۱۰۶	۴۳/۰	۲/۵۳	۰/۵۸	۰/۸۴	۰/۰۰۲
۱۰۹	۳۳/۴	۰/۲۶	۰/۳۸	۰/۵۵	۰/۰۰۰
۱۱۰	۳۴/۴	۰/۲۰	۰/۴۳	۰/۵۹	۰/۰۰۰
۱۴۷	۳۳/۳	۰/۰۵	۰/۶۱	۰/۵۵	۰/۰۰۰
۱۴۸	۱۷/۳	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰
۱۵۰	۸/۱	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰
۱۶۲	۸/۲	۰/۴۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰۰
شاخص قابلیت اطمینان کل شبکه					
شاخص قابلیت اطمینان منطقه‌ای					

جدول ۶- مقادیر قابلیت اطمینان گرهی، منطقه‌ای و کل شبکه در شبکه اهر در وضعیت موجود

گره	فشار گرهی	تقاضای گرهی	FRI	HBNP	HBSB
۳۶	۱۵/۹	۱/۲۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۳۷	۳۵/۸	۵/۸۷	۰/۶۸	۰/۶۴	۰/۰۰
۳۸	۴۰/۷	۴/۸۷	۰/۵۵	۰/۷۸	۰/۰۰
۳۹	۳۶/۴	۲/۹۳	۰/۸۶	۰/۶۶	۰/۰۰
۴۰	۳۵/۷	۳/۴۷	۰/۷۴	۰/۶۳	۰/۰۰
۴۱	۲۶/۵	۳/۶۷	۰/۰۳	۰/۱۴	۰/۰۰
۴۲	۲۷/۴	۳/۶۷	۰/۱۲	۰/۲۴	۰/۰۰
۴۳	۳۳/۴	۱/۶۰	۰/۴۷	۰/۵۵	۰/۰۰
۴۴	۳۳/۴	۳/۳۳	۰/۵۱	۰/۵۵	۰/۰۰
۴۵	۳۶/۲	۱/۶۶	۰/۸۵	۰/۶۵	۰/۰۰
۴۶	۴۲/۹	۶/۴۵	۰/۵۴	۰/۸۴	۰/۰۰
۴۷	۳۳/۳	۵/۹۳	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۰۰
۴۸	۴۰/۳	۲/۰۶	۰/۸۰	۰/۷۷	۰/۰۰
۴۹	۳۳/۳	۶/۱۹	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۰۰
۹۳	۱۶/۴	۰/۷۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۹۴	۲۵/۷	۲/۳۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۹۵	۲۹/۲	۱/۴۰	۰/۲۵	۰/۳۶	۰/۰۰
۹۶	۳۶/۰	۴/۴۴	۰/۸۳	۰/۶۴	۰/۰۰
۹۷	۳۶/۵	۲/۱۳	۰/۸۷	۰/۶۶	۰/۰۰
۱۰۱	۱۰/۲	۱/۲۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۰۲	۱۷/۰	۳/۹۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۰۳	۱۵/۴	۳/۴۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۰۶	۴۲/۰	۳/۳۱	۰/۶۶	۰/۸۲	۰/۰۰
۱۰۹	۲۹/۲	۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۳۶	۰/۰۰
۱۱۰	۳۳/۳	۰/۹۷	۰/۳۷	۰/۵۵	۰/۰۰
۱۴۷	۲۹/۱	۰/۰۵	۰/۲۶	۰/۳۶	۰/۰۰
۱۴۸	۱۶/۹	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۵۰	۶/۶	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۶۲	۶/۷	۰/۴۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
شاخص قابلیت اطمینان کل شبکه					
شاخص قابلیت اطمینان منطقه‌ای					

بررسی عملکرد شبکه توزیع آب اهر در وضعیت قبل از ساخت و سازها و وضعیت موجود نشان می‌دهد که شبکه توزیع آب اهر به جزء در تعدادی از گره‌ها همچنان از عملکرد خوبی برخوردار است هر چند به دلیل این که شبکه توزیع آب اهر قبل از ساخت و سازها با کمبود فشار در برخی مناطق مواجه بوده است، ساخت و سازهای انجام شده این موضوع را تقویت نموده است. اما در بیشتر بخش‌های شبکه مشکلی در عملکرد شبکه ایجاد نکرده است و ساخت و سازهای انجام شده اندک تغییرات را نسبت به حالت قبل از ساخت و سازها ایجاد کرده است. وضعیت آتی به وضعیتی گفته می‌شود که در آن تعداد ساختمان‌های بلندمرتبه زیادی که در آنها طرح‌های جامع شهری رعایت نشده است، ساخته شده و به مرحله بهره‌برداری رسیده باشد. در این وضعیت با توجه به این که قسمت‌های مرکزی شهر و بافت‌های قدیمی شهر از جاذبه‌های بالایی برخوردار هستند، ساخت و سازها در آن قسمت‌ها تمرکز پیدا می‌کند و به یکباره واحدهای آپارتمانی زیادی در آنجا احداث خواهد شد بر اساس مطالعات میدانی، فرض شده است که در حدود ۵۰ الی ۱۰۰ ساختمان بلندمرتبه در قسمت مرکزی شهر احداث بشود. با اعمال مصارف فوق در گره‌های مناطق مرکزی شبکه، مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه انجام گردید که نتایج آن در جدول (۷) نشان داده شده است.

همان طوری که مشخص است در وضعیت موجود، شبکه با کمی افت فشار نسبت به شرایط قبل از ساخت و سازها مواجه می‌باشد به طوری که فشار منطقه‌ای شبکه در وضعیت موجود نسبت به شرایط قبل از ساخت و سازها بیش از ۱/۵ متر کاهش یافته است و این مسئله در گره‌های ۴۲، ۹۵، ۱۰۹ و ۱۴۷ بیشتر مشهود است به طوری که در وضعیت قبل از ساخت و سازها دارای فشار به ترتیب ۳۱/۶، ۳۳/۴، ۳۳/۴ و ۳۳/۳ متر است که بعد از ساخت و سازها و در وضعیت موجود به ترتیب به ۲۷/۴، ۲۹/۲، ۲۹/۲ و ۲۹/۱ متر کاهش یافته است. بررسی مقادیر قابلیت اطمینان هیدرولیکی برای کل شبکه نشان می‌دهد که مقادیر شاخص قابلیت اطمینان فازی با اندکی کاهش (۰/۰۱)، مقادیر شاخص اطمینان‌پذیری فشار بدون تغییر و مقادیر شاخص اطمینان‌پذیری نیاز آبی با اندکی افزایش (۰/۰۱) مواجه است و در مجموع وضعیت کل شبکه بدون تغییر باقی‌مانده است. این در حالی است که بررسی مقادیر قابلیت اطمینان هیدرولیکی برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقادیر شاخص قابلیت اطمینان فازی از ۰/۴۴ به ۰/۳۶ و مقادیر شاخص اطمینان‌پذیری فشار از ۰/۴۵ به ۰/۳۹ کاهش یافته و در مجموع از نظر کارایی افت نموده است.

جدول ۷- مقادیر قابلیت اطمینان گرهی، منطقه‌ای و کل شبکه در شبکه اهر در وضعیت آتی

گره	فشار گرهی	تقاضای گرهی	FRI	HBNP	HBSB
۳۶	۱۵/۱	۱/۲۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۳۷	۳۲/۹	۸/۹۵	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۰۰
۳۸	۳۵/۸	۷/۹۵	۰/۵۸	۰/۶۴	۰/۰۰
۳۹	۳۰/۶	۶/۰۱	۰/۳۸	۰/۴۴	۰/۰۰
۴۰	۲۹/۶	۶/۵۴	۰/۲۸	۰/۳۹	۰/۰۰
۴۱	۲۰/۸	۶/۷۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۴۲	۲۱/۷	۳/۶۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۴۳	۲۷/۵	۴/۶۸	۰/۰۹	۰/۲۵	۰/۰۰
۴۴	۲۷/۵	۶/۴۱	۰/۱۰	۰/۲۵	۰/۰۰
۴۵	۳۰/۲	۴/۷۴	۰/۳۵	۰/۴۲	۰/۰۰
۴۶	۳۷/۱	۹/۵۳	۰/۸۴	۰/۶۸	۰/۰۰
۴۷	۲۷/۵	۹/۰۱	۰/۱۱	۰/۲۵	۰/۰۰
۴۸	۳۴/۶	۵/۱۴	۰/۷۲	۰/۶۰	۰/۰۰
۴۹	۲۷/۵	۹/۲۷	۰/۰۹	۰/۲۵	۰/۰۰
۹۳	۱۶/۱	۰/۷۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۹۴	۲۰/۰	۲/۳۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۹۵	۲۳/۵	۱/۴۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۹۶	۲۹/۸	۷/۵۲	۰/۳۲	۰/۴۰	۰/۰۰
۹۷	۳۰/۵	۵/۲۱	۰/۳۷	۰/۴۳	۰/۰۰
۱۰۱	۵/۵	۱/۲۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۰۲	۱۵/۷	۵/۵۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۰۳	۱۰/۷	۳/۴۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۰۶	۳۶/۱	۶/۳۹	۰/۸۴	۰/۶۵	۰/۰۰
۱۰۹	۲۳/۵	۰/۲۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۱۰	۲۷/۴	۰/۹۷	۰/۰۷	۰/۲۵	۰/۰۰
۱۴۷	۲۳/۴	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۴۸	۱۵/۶	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۵۰	۱/۹	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۶۲	۲/۰	۰/۴۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
شاخص قابلیت اطمینان کل شبکه					
شاخص قابلیت اطمینان منطقه‌ای					
			۰/۲۶	۰/۳۱	۰/۱۴
			۰/۱۹	۰/۲۲	

مدل شبکه توزیع آب اهر با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده در زمان حداکثر مصرف با کمینه کردن اختلاف فشار مشاهداتی و محاسباتی در برخی گره‌های شبکه توزیع آب کالیبره گردیده است. برای کالیبراسیون هیدرولیکی شبکه، از تلفیق مدل شبیه‌ساز EPANET و الگوریتم بهینه‌ساز جامعه مورچگان در محیط Matlab استفاده شده است. نتایج کالیبراسیون برای داده‌های تست نشان می‌دهد که بهترین مقدار تابع هدف برابر ۱۲/۶ بوده و در حالت دسته بندی پارامترها به ۶ دسته مجزا به دست می‌آید. برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه در وضعیت قبل از ساخت و سازها، وضعیت موجود (بعد از ساخت و سازها) و وضعیت آتی (توسعه ساخت و سازها در قسمت‌های مرکزی شهر) از بهترین مدل بخش کالیبراسیون استفاده گردیده است. شبیه‌سازی مدل شبکه آب اهر در شرایط بارگذاری حداکثر مصرف انجام گردید و به دلیل وضعیت بحرانی در شرایط بارگذاری حداکثر مصرف تنها به تحلیل نتایج در این شرایط پرداخته شده است. برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه نیز از سه شاخص قابلیت اطمینان فازی (FRI)، شاخص اطمینان‌پذیری فشار (HBNP) و شاخص اطمینان-پذیری نیازآبی (HBSD) استفاده شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که شبکه توزیع آب اهر، هرچند در وضعیت موجود با اندکی افت فشار در گره‌ها و افت کارایی هیدرولیکی در منطقه مورد بررسی مواجه شده است ولی همچنان از عملکرد خوبی برخوردار است. در مجموع در صورتی که ساخت و سازها به شکل گذشته خود و خارج از طرح‌های جامع شهری ادامه پیدا کنند، این مسئله و افزایش مصارف ناشی از آنها به دلیل این که در نقاط خاصی از شهر تمرکز یافته، عملکرد شبکه را دچار مشکل خواهد نمود به طوری که افت شدید فشار در گره‌های شبکه و افت شدید کارایی هیدرولیکی شبکه را به همراه خواهد داشت. به طور مثال فشار در گره ۴۲ از ۳۱/۶ متر به ۲۱/۷ متر، مقدار منطقه‌ای شاخص قابلیت اطمینان فازی از ۰/۴۴ به ۰/۱۹ و مقدار منطقه‌ای شاخص اطمینان‌پذیری فشار از ۰/۴۵ به ۰/۲۲ کاهش یافته است.

۶- سپاس‌گزاری

بدینوسیله از مدیریت و کارکنان اداره آب و فاضلاب شهر اهر که در تهیه و جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز شبکه آب اهر همکاری لازم را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌شود.

۷- مراجع

امین‌زاده ب، "معضلات افزایش تراکم در بافت‌های فرسوده شهر"، اولین سمینار ساخت و ساز در پایتخت، دانشکده فنی دانشگاه تهران، بهمن، ۱۳۸۱.

مقایسه نتایج برای وضعیت قبل از ساخت و سازها و وضعیت آتی نشان می‌دهد که در وضعیت آتی کاهش فشار در گره‌های شبکه محسوس می‌باشد. به عبارتی مقایسه نتایج جدول (۵) و جدول (۷) نشان می‌دهد که فشار منطقه‌ای شبکه در وضعیت آتی نسبت به شرایط قبل از ساخت و سازها بیش از ۶/۴ متر کاهش یافته است و مقایسه مقادیر فشار در گره‌های ۴۲، ۹۵، ۱۰۹ و ۱۴۷ نشان می‌دهد که مقادیر فشار در وضعیت قبل از ساخت و سازها به ترتیب ۳۱/۶، ۳۳/۴، ۳۳/۴ و ۳۳/۳ متر است که بعد از ساخت و سازها و در وضعیت آتی به ترتیب به ۲۱/۷، ۲۳/۵، ۲۳/۵ و ۲۳/۴ متر کاهش یافته است. همچنین مقایسه مقادیر شاخص قابلیت اطمینان فازی در وضعیت قبل از ساخت و سازها و وضعیت آتی نشان می‌دهد که این شاخص برای کل شبکه از ۰/۳۱ به ۰/۲۶ و در حالت منطقه‌ای از ۰/۴۴ به ۰/۱۹ کاهش یافته است. مقدار شاخص اطمینان‌پذیری فشار در وضعیت قبل از ساخت و سازها برای کل شبکه ۰/۴۱ بوده که به در وضعیت آتی به ۰/۳۱ کاهش یافته و مقدار منطقه‌ای این شاخص از ۰/۴۵ به ۰/۲۲ کاهش یافته است. مقدار شاخص اطمینان‌پذیری نیاز آبی برای کل شبکه در دو وضعیت قبل از ساخت و سازها و وضعیت آتی به ترتیب ۰/۱۶ و ۰/۱۴ می‌باشد.

بررسی عملکرد شبکه توزیع آب اهر در وضعیت آتی و وضعیت قبل از ساخت و سازها نشان می‌دهد که شبکه توزیع آب اهر در وضعیت آتی با افت کارایی هیدرولیکی شدیدی مواجه است، به طوری که این افت کارایی در منطقه مورد بررسی بیشتر قابل درک است. به طور مثال شاخص قابلیت اطمینان فازی منطقه‌ای با افت ۰/۲۵ و شاخص اطمینان‌پذیری فشار با افت ۰/۲۲ مواجه می‌باشد و در مجموع در صورتی که ساخت و سازها به شکل گذشته خود و خارج از طرح‌های جامع و توسعه شهری اهر ادامه پیدا کند، به دلیل این که در کوچه و پس کوچه‌های وسط شهر و در نقاط خاصی از شهر تمرکز یافته است عملکرد شبکه را دچار مشکل خواهد نمود. افت شدید فشار در گره‌های منتهی به منطقه ساخت و ساز و افت شدید عملکرد هیدرولیکی شبکه در آن مناطق از جمله مشکلات می‌باشد.

اولین راه‌کار برای مقابله با این مشکل بازنگری در مجوزهای ساخت و ساز شهری و رعایت ضوابط طرح‌های توسعه شهری است و دومین راه‌کار ارائه طرح‌های اصلاح، بازسازی و نوسازی شبکه بر اساس الزامات جدید می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر ساخت و سازهای خارج از طرح‌های جامع شهری بر روی عملکرد هیدرولیکی شبکه توزیع آب اهر مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا ضرایب هیزن و بلیامز

- دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.
- مرادی ع، کاشفی پور س.م، سلیمی آ، فرشاد ر، "ضرورت بازنگری در برخی از مبانی الگوی تقاضا در طراحی شبکه‌های توزیع آب"، همایش ملی الگوهای توسعه پایدار در مدیریت آب، شرکت مهندسی مشاور مهتاب ثامن، مشهد، اسفند، ۱۳۸۸.
- محمودی م، "نقش ضوابط و مقررات شهرسازی در بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان"، دومین همایش بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان، سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور، تهران، اسفند، ۱۳۸۱.
- مهرجو م، آفریدی ص، "بررسی رشد شهرنشینی بر روند خاطره‌زدایی و هویت شهری در شهرهای معاصر ایران (محلّه عودلاجان تهران)"، همایش ملی معماری و شهرسازی معاصر ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بیضا، شیراز، فروردین ۱۳۸۹.
- نوریان ف، سلیمانی‌راد م، حبیبی ک، "طراحی شهری و مداخله تاریخی در بافت قدیم شهر همدان"، اولین کنفرانس بین‌المللی سکونت‌گاه‌های سنتی زاگرس، دانشگاه کردستان، سنندج، اردیبهشت، ۱۳۸۷.
- Borzi A, Gerbino E, Bovis S, Corradini M, "Genetic algorithms for water distribution network calibration: A real application", Proceedings of the 8th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, University of Exeter, UK, 2005.
- Carrijo IB, Reis LFR, Walters GA, Savic DA, "Operational optimization of WDS based on multi objective genetic algorithms and operational extraction rules using data Mining", Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress. Salt Lake City. Utah. USA, June 27-July 1, 2004.
- Dini M, Tabesh M, "Hydraulic calibration of water distribution networks based on ACO algorithms", second conference on smart monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. Istanbul, Turkey. 9-11 September, 2013.
- Dini M, Tabesh M, "A New Method for Simultaneous Calibration of Demand Pattern and Hazen-Williams Coefficients in Water Distribution Systems", Journal of Water Resources Management, 2014, 28, 2021-2034.
- Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A, "The ant system: Optimisation by a colony of cooperating agents", IEEE Transactions on Systems, Part B: Cybern, 1996, 26 (1), 29-41.
- Ormsbee LE, Wood DJ, "Explicit pipe network calibration", Journal of Water Resources planning and Management, ASCE, 1986, 112 (2), 166-182.
- Prasad TD, Park NS, "Multiobjective genetic algorithm for design of water distribution networks", Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130 (1), 73-82.
- Rossman LA, "EPANET2: user's manual", U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, Ohio, 2000.
- بهرام‌پور ع، مدیری آ، "مطالعه رابطه میان رضایتمندی ساکنان از محیط زندگی و میزان حس تعلق آنها در مجتمع مسکونی بلندمرتبه شهرک کوثر تهران"، نشریه هنرهای زیبا معماری و شهرسازی، ۱۳۹۴، ۲۰ (۳)، ۸۵-۹۴.
- جنوبی ا، "نگاهی تازه به مرمت بافت‌های فرسوده درون شهری"، نخستین همایش ملی استحکام بخشی ساختمان‌های بنایی غیر مسلح و بناهای تاریخی، شهرداری شیراز، شیراز، آذر، ۱۳۸۴.
- رحیمی ر، نورتقانی ع.م، "گسیختگی معماری شهر و اتلاف انرژی"، پنجمین همایش بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان، سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور، تهران، اردیبهشت، ۱۳۸۵.
- رهبر د، "ضرورت ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تراکم و بلندمرتبه‌سازی در تهران"، اولین سمینار ساخت و ساز در پایتخت، دانشکده فنی دانشگاه تهران، بهمن، ۱۳۸۱.
- زینلی ا، شناسایی نقش مؤلفه‌های طبیعی در ایجاد هویت شهری (نمونه موردی: شهر بابل)، دوفصلنامه پژوهش‌های منظر شهر، ۱۳۹۴، ۲ (۴)، ۷-۱۸.
- دینی م، عزیزی ع، "تأثیر بلندمرتبه‌سازی بر عملکرد شبکه‌های توزیع آب شهری"، اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، دانشگاه آزاد اسلامی لشت‌نشا، زیباکنار، اسفند ۱۳۹۰.
- دینی م، عزیزی ع، "تأثیر ساخت و سازهای ناسازگار بر عملکرد هیدرولیکی شبکه توزیع آب"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل، اردیبهشت ۱۳۹۳.
- دینی م، "بررسی تأثیر بلندمرتبه‌سازی‌های خارج از مقررات طرح جامع در شهر اهر، فصلنامه علمی- پژوهشی فضای جغرافیایی، ۱۳۹۴، ۱۲ (۳۷)، ۵۲-۶۴.
- شریعتمداری د، بنیانی م، "اهداف توسعه پایدار در ساخت و ساز، ششمین همایش مقررات ملی ساختمان"، دبیرخانه دائمی مقررات ملی ساختمان، شیراز، اسفند، ۱۳۹۳.
- فاضلی ع.ر، حیدری ش، "بهینه‌سازی مصرف انرژی در مناطق مسکونی شهر تهران با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی انرژی روتردام (REAP)"، مجله پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی، ۱۳۹۲، ۱ (۳)، ۸۳-۹۶.
- فرد س، زعیم دار س، "معماری سنتی با توجه به ساخت و ساز پایدار، نمونه موردی: شهرستان مهاباد"، اولین کنفرانس بین‌المللی سکونت‌گاه‌های سنتی زاگرس، دانشگاه کردستان، سنندج، اردیبهشت ۱۳۸۷.
- قاجاریان ن، "طراحی و توسعه پویای چند معیاره شبکه‌های توزیع آب شهری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب،

- Tabesh M, Jamasb M, Moeini R, "Calibration of water distribution hydraulic models considering different decision variables and consumption scenarios", Journal of Hydraulics, Iranian Hydraulic Association (in Persian), 2010, 4 (3), 69-78,
- Tabesh M, Jamasb B, Moeini R, "Calibration of water distribution hydraulic models: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses", Urban Water Journal, 2011, 8 (2), 93-102.
- Yu G, Powell RS, "Optimal design of meter placement in water distribution systems", International Journal of Systematic Science, 1994, 25 (12), 2155-2166.

EXTENDED ABSTRACT

Evaluating Ahar Water Distribution Network Performance after Excessive High-Rise Building Constructions

Mehdi Dini*

Civil Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Received: 23 August 2016; Accepted: 21 May 2017

Keywords:

High-rise building construction, Ahar water distribution network, Ant colony optimization, Hydraulic performance, reliability index.

1. Introduction

Gradually, with urban population growth and development of Ahar city, old houses in the lanes and alleys are changing into high-rise buildings. In most of these buildings the regulations are violated. This issue has created a lot of problems for the inhabitants. The goal of the paper is to answer this question: "what is the consequence of high rise building constructions without observing urban rules and regulations on hydraulic performance of the Ahar water distribution network?" To answer this question, Ahar water distribution network was selected as a case study and its hydraulic performances were investigated in different situations.

2. Methodology

In this paper, the ant colony optimization algorithm is used to adjust the model parameters by minimizing the difference between the model-predicted and the field-observed data that are coupled with EPANET (Rossman, 2000). The probability function of the ACO algorithms (Zecchin et al., 2005) is as eq. (1):

$$P_{ij}(k, t) = \frac{[T_{ij}(t)]^\alpha [U_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j=1}^J [T_{ij}(t)]^\alpha [U_{ij}(t)]^\beta} \quad (1)$$

where $P_{ij}(k, t)$: is the probability of the k -th ant situated at node j at stage t , to choose an outgoing edge i , $T_{ij}(t)$: is the pheromone intensity present on the edge i at node j and stag t , $U_{ij}(t)$: is the desirability factor present on the edge i at node j and stage t , and α, β are the parameters controlling the relative importance of pheromone intensity and desirability for each ant's decision. The pheromone intensity function is as eq. (2):

$$T_{i,j}(t + 1) = \rho T_{i,j}(t) + \Delta T_{i,j}(t) \quad (2)$$

where ρ : is the pheromone persistence factor representing the pheromone decay (evaporation) rate (note: $0 < \rho < 1$); $\Delta T_{i,j}(t)$: is the pheromone addition on edge i at node j and stage t . The decay of the pheromone levels enables the colony to forget poor edges and increases the probability of good edges being selected; $T_{i,j}(t + 1)$: is the pheromone intensity present on the edges i at node j and the stage $(t + 1)$. The objective function is written as eq. (3) (Dini & Tabesh 2013).

$$F = \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T (PO_{tj} - PS_{tj})^2 \quad (3)$$

where N : is the number of observation locations; T : is the number of times that field data has been collected; POT_j : is the observed pressure head; and PSt_j : is the calculated pressure head at node j during time t ; Ahar is an old town, where most buildings are one or two floors and in certain areas the floors are 4 at most. In recent years, incidentally some approvals were issued to construct high rise buildings up to 12 floors in Ahar city that, in most of these buildings the regulations are violated. All high rise buildings were constructed in central and western parts of the city. The construction of these buildings has changed the demands needed for network nodes. To study the effects of these changes on hydraulic performances of network, water distribution network was selected as a case study. Figure 3 shows the Ahar water distribution network that has been skeletonised by excluding dispensable pipes (Dini & Tabesh 2014). The simplified network includes 192 pipes, 169 nodes, one reservoir, 5 tanks and 3 pumping stations. To study the hydraulic performance of the Ahar water distribution network, Fuzzy Reliability Index (FRI) (Ghajarniya, 2009), Hydraulic Benefit of Nodal Pressure (HBNP) and the Hydraulic Benefit of Satisfactory Demand (HBSD) (Karijoo et al. 2004) are used.

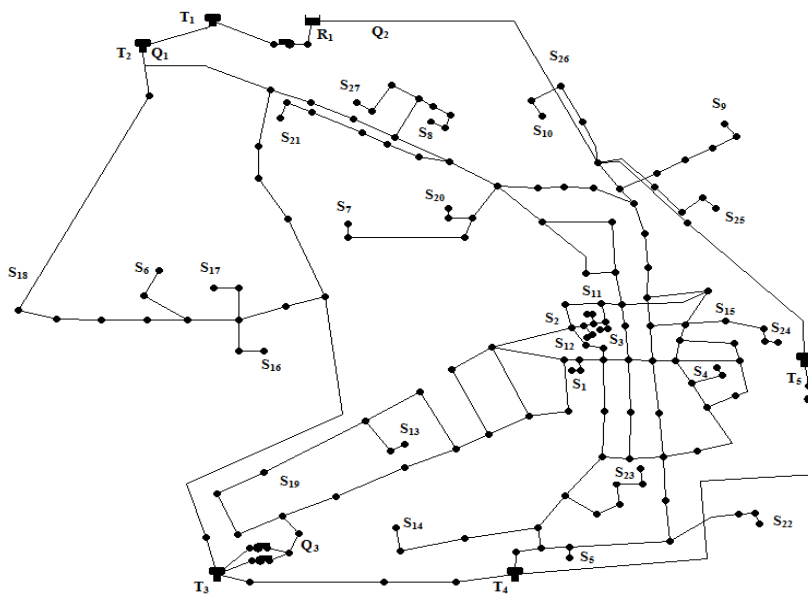


Figure 1: The structure of Ahar water distribution network

3. Results and discussion

To study the effects of excessive high-rise building constructions to the performance of Ahar water distribution network, first water distribution network model is calibrated and then its hydraulic performance is studied in three conditions such as the status before constructions, the present status (after the recent constructions), and the future status (developing the constructions in central parts of the city in the future). To simplify the problem, pipe roughness coefficients were classified into limited categories, based on the pipe diameter in the network. Table 1 illustrates the results of a calibration of Ahar water distribution network.

Table 1: The results of a calibration of Ahar water distribution network

Category 4		Category 3		Category 2		Category 1	
C	Adjusted C	C	Adjusted C	C	Adjusted C	C	Adjusted C
C1	128	C1	70	C1	83		
C2	77	C2	84				
C3	140	C3	104	C2	80	C1	86
...	...	C4	77				
C117	103	C5	91	C3	94		
C118	119	C6	150				
Learning data error							
30.5		177.3		225		233.6	
Testing data error							
15.2		12.6		13.2		17.9	
C= Number of pipe roughness coefficient subcategories							
Adjusted C = The adjusted amount of pipe roughness coefficient							

The results of a calibration showed that the minimum testing data error belonged to the category of C3 with a value of 12.6. For evaluating the hydraulic performance of the network in three conditions, the network is modeled for the category of C3. Table 2 illustrated the results of evaluating of the Fuzzy Reliability Index (FRI), Hydraulic Benefit of Nodal Pressure (HBNP) and Hydraulic Benefit of Satisfactory Demand (HBSD) in three conditions as a total and areal reliability index.

Table 2: The hydraulic performance of the network in three conditions

Conditions		FRI (%)	HBNP (%)	HBSP
Before status	Total	0.31	0.41	0.16
	Areal	0.44	0.45	-
Present status	Total	0.30	0.41	0.17
	Areal	0.36	0.39	-
Future status	Total	0.26	0.31	0.14
	Areal	0.19	0.22	-

Comparison of the performance of Ahar water distribution network for three proposed statuses showed that all of three reliability indices have small reductions in present status, but they have a big reduction in future status. On the whole, if the constructions continue as the trend before and out of regarding the comprehensive and developmental city and considering that the constructions are mainly focused in the city center, the performance of the network will be endangered. The highest reduction of nodal pressure ending in areas under constructions and the great reduction in the hydraulic performance of the network in that area is among the consequences.

4. Conclusions

The aim of this paper is to study the effects of constructing high-rise buildings without considering the regulations of the comprehensive city design in Ahar on the performance of water distribution network. Thus, the ant colony optimization algorithm is used to adjust the model parameters by minimizing the difference between the model-predicted and the field-observed data that are coupled with EPANET. Then the best calibrated model was used to simulate the hydraulic performance of the water distribution network for different conditions before and after high-rise building constructions. They were assessed by using the fuzzy reliability index (FRI), hydraulic benefit in adequate nodal pressure (HBNP), and hydraulic benefit in satisfactory demand (HBSD). The results showed that Ahar water distribution network enjoyed a good performance after the constructions and meanwhile, it encountered with a shortage of pressure in some areas before the constructions and these constructions have made the problem more severe. Hydraulic performance of the network will be endangered if the present trend of constructions is continued and they are concentrated in certain areas of the city. For example, the pressure in node 42 will decrease from 31.6m to 21.7m and the areal amount of the fuzzy reliability index will be reduced from 0.44 to 0.19.

5. References

- Carrijo IB, Reis LFR, Walters GA, Savic DA, "Operational optimization of WDS based on multi objective genetic algorithms and operational extraction rules using data Mining", Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress. Salt Lake City. Utah. USA, June 27-July 1, 2004.
- Dini M, Tabesh M, "Hydraulic calibration of water distribution networks based on ACO algorithms", second conference on smart monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. Istanbul, Turkey, 9-11 September, 2013.
- Dini M, Tabesh M, "A New Method for Simultaneous Calibration of Demand Pattern and Hazen-Williams Coefficients in Water Distribution Systems", Journal of Water Resources Management, 2014, 28, 2021-2034.
- Dorigo M, Maniezzo V, Coloni A, "The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents", IEEE Transactions on Systems, Part B: Cybern, 1996, 26(1), 29-41.
- Ghajarniya N, "Multi-criteria design and dynamic development of urban water distribution networks", MA Thesis in Water Resources Management, Faculty of agricultural engineering, University College of agriculture and natural, University of Tehran, 2009.
- Rossman LA, "EPANET2: user's manual", US. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, Ohio, 2000.
- Zechin AC, Simpson AR, Maier H, Leonard M, Roberts AJ, Berrisford MJ, "Application of two ant colony optimization algorithms to water distribution system optimization", Journal of Mathematical and Computer Modeling, 2006, 44, 451-468.