

آنالیز فازی شبکه‌های توزیع آب تحت شرایط کمبود فشار

سمیرا گوهری‌مقدم^{۱*}، کورش قادری^۲، مجید رحیم‌پور^۳ و محمد مهدی احمدی^۴

چکیده

به‌طور کلی دو نوع تحلیل در شبکه‌های آبرسانی مرسوم است: ۱- تحلیل مبتنی بر تقاضا و ۲- تحلیل مبتنی بر فشار. یک شبکه توزیع آب ممکن است به دلیل بالا رفتن زبری لوله‌ها، شکست لوله‌ها یا ناکافی بودن فشار پمپ، دچار کمبود آب باشد (یا بشود). در چنین شرایطی شبکه در همه گره‌ها نمی‌تواند تقاضای مورد نیاز را تأمین کند؛ بنابراین برخلاف آنالیز وابسته به تقاضای ثابت، تحت شرایط کمبود فشار، خروجی گره‌ها غیر ثابت و تابعی از هدهای فشاری در دسترس است که به مجموعه معادلات حاکم بر شبکه اضافه می‌شود. در این تحقیق با توسعه یک مدل، حل این معادلات به صورت مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است که شبیه‌سازی بر اساس فراخوانی نرم‌افزار شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET در محیط متلب و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. مدل مذکور مبتنی بر آنالیز فازی بوده تا چگونگی انتشار عدم قطعیت از متغیرهای مستقل یا پارامترهای اساسی (مثل تقاضای مورد نیاز گره‌ها و ضرایب زبری لوله‌ها) به متغیرهای وابسته (مثل جریان لوله‌ها، خروجی گره‌ها و هدهای در دسترس) را نشان دهد. برای صحت‌سنجی، دو شبکه از تحقیقات پیشین انتخاب شد و شبکه‌ها با مدل توسعه داده شده و نرم‌افزار WaterNetGen تحلیل شدند و نهایتاً نتایج با هم مقایسه شد. سپس ب عنوان مطالعه موردی به تحلیل هیدرولیکی شبکه توزیع آب شهر جنگل تحت شرایط غیرقطعی و کمبود فشار پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان داد که در شرایط کمبود فشار اختلاف نتایج حاصل از تحلیل مبتنی بر فشار و تحلیل مبتنی بر تقاضا، قابل توجه است. با مدل بهینه‌سازی پیشنهادی می‌توان محدوده پاسخ‌های سیستم را بدون نیاز به یکنواخت بودن ارتباط بین پارامترهای مستقل و وابسته به دست آورد. در این تحقیق فقط مقادیر تقاضای گره‌ها غیرقطعی در نظر گرفته شده است؛ در حالی که برای شناسایی بهتر نواحی آسیب‌پذیر در شبکه توزیع آب، می‌توان هر پارامتر غیرقطعی دیگری به عنوان متغیر، به الگوریتم اضافه کرد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز فازی، الگوریتم ژنتیک، تحلیل مبتنی بر فشار، شبکه‌های توزیع آب.

ارجاع: گوهری‌مقدم س. قادری ک. رحیم‌پور م. و احمدی م. م. ۱۴۰۲. آنالیز فازی شبکه‌های توزیع آب تحت شرایط کمبود فشار. مجله پژوهش آب ایران. ۴۸: ۴۷-۵۸. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.13998.2435>

۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

* نویسنده مسئول asad18_me5@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۴

مقدمه

یک شبکه توزیع آب برای تأمین خواسته‌های پیش‌بینی‌شده با ارتفاع فشار موجود کافی (در همه گره‌های شبکه) در طول عمر پروژه طراحی می‌شود. تقاضای حقیقی گره‌ها ممکن است به دلیل رشد سریع غیرمنتظره در همه نواحی بیشتر از تقاضاهای مورد انتظار باشد. حتی اگر رشد سراسری مورد انتظار باشد، ممکن است به دلیل تقاضای بیشتر (به دلیل سرقت یا نشتی بیش از حد آب) در بعضی نواحی دیگر عدم تعادل ایجاد شده و باعث شود که خروجی در بعضی گره‌ها بیشتر از تقاضای طراحی باشد؛ بنابراین تقاضاهای پروژه غیرقطعی هستند. یک پارامتر غیرقطعی دیگر در طراحی شبکه‌های آبرسانی ضریب زبری لوله‌ها به دلیل روند طبیعی فرسوده شدن و برجستگی رسوبات داخل سطح لوله‌هاست. چندین روش در تحقیقات گذشته پیشنهاد شده که چگونگی انتشار عدم قطعیت پارامترهای مستقل را به پارامترهای وابسته با در نظر گرفتن پارامترها به صورت فازی نشان می‌دهد (ریولی و ریدفلی، ۲۰۰۲؛ برنیساولجویک و ایوتیک، ۲۰۰۶؛ گوپتا و بیهو، ۲۰۰۷؛ شیو و ردی، ۲۰۱۱؛ اسپیلیوتیس و تساکریس، ۲۰۱۲). در همه این روش‌ها فرض شده که تقاضاهای مورد نیاز غیرقطعی در همه گره‌ها به طور کامل تأمین شود؛ اما در عمل به دلیل افزایش تقاضا، ارتفاع فشار در بعضی گره‌ها کاهش می‌یابد، تا جایی که این گره‌ها ممکن است جزئی یا هیچ مقدار از آب مورد نیاز را دریافت کنند (گوپتا و همکاران، ۲۰۱۴)؛ بنابراین هر آنالیزی که تقاضای تصادفی در آن همیشه رضایت بخش فرض شود (مثل آنالیز فازی وابسته به تقاضا^۱ (FDFA)) برای وقتی که شبکه‌های توزیع آب دچار کمبود فشار شوند، نادرست خواهد بود. بسیاری از مطالعات موردی بر نحوه فرمول‌بندی رابطه بین ارتفاع فشار و خروجی (جریان) گره متمرکز هستند (بیهو، ۱۹۸۱؛ گرمانوپولس، ۱۹۸۵؛ واگنر و همکاران، ۱۹۸۸؛ تیمیاح و همکاران، ۲۰۱۰؛ شارونی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۶؛ کیاپونی و کریکو، ۲۰۱۸؛ ویدیا و مالی، ۲۰۱۹). گوپتا و بیهو (۱۹۹۶) فرمول‌بندی ارتفاع فشار-جریان گره توسعه داده‌شده توسط محققان مختلف را مقایسه کردند. ابدی ساید و گوپتا (۲۰۱۳) نیز به مقایسه فرمول‌بندی ارتفاع فشار-جریان گره توسط محققان مختلف پرداختند

و روش‌های به‌کارگیری آن‌ها را به دو روش مستقیم و غیرمستقیم طبقه‌بندی کردند. گرانمهر و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO: Particle Swarm Optimization) و به کمک نرم‌افزار EPANET، مدل پشتیبان تصمیم برای انجام تحلیل مبتنی بر فشار را ارائه کردند. گوپتا و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از روش تأثیر گوپتا و بیهو (۲۰۰۷) و با توجه به رابطه بین دبی خروجی و هد در دسترس گره‌ها (که در تحقیق واگنر و همکاران (۱۹۸۸) ارائه شده است) به تحلیل عدم قطعیت شبکه توزیع آب تحت شرایط کمبود فشار پرداختند. ساریتو و گوپتا (۲۰۲۰) با استفاده از الگوریتم جایا (که راتو (۲۰۱۶) آن را پیشنهاد داده است) به آنالیز فازی جریان گره تحت تقاضای فازی پرداختند. امروزه با توسعه سخت‌افزارها و افزایش سرعت رایانه‌ها، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، فقط محدود به مسائل بهینه‌سازی نیست. مسائلی که شامل حل دستگاه معادلات غیرخطی هستند را نیز می‌توان به فرم یک مسئله بهینه‌سازی نوشت و به کمک این روش‌ها و به‌سادگی حل کرد. در این حالت مجهولات دستگاه معادلات، متغیرهای تصمیم مسئله بهینه‌سازی خواهد بود. در تحقیق حاضر آنالیز فازی جریان گره^۲ (FNFA) در شرایط کمبود فشار با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده و نتایج با تحقیق گوپتا و همکاران (۲۰۱۴)، ساریتو و گوپتا (۲۰۲۰) و نرم‌افزار WaterNetGen مقایسه شده است. در آنالیز پیشنهادی علاوه بر معادلات بقای جرم در گره‌ها و بقای انرژی در حلقه‌ها، لازم است روابط بین فشار موجود و دبی قابل‌برداشت از هر گره نیز به مجموعه معادلات حاکم بر شبکه اضافه و به‌طور هم‌زمان حل شوند. برای حل این معادلات از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (GA) و فراخوانی EPANET (به‌منظور شبیه‌سازی) در محیط متلب استفاده شده است. گرچه مدل‌های مختلفی برای تحلیل مبتنی بر فشار مانند EPANET-EMITTER، WaterNetGen، WaterGEMS و... ارائه شده است؛ اما به دلیل متفاوت بودن روابط ارتفاع فشار-جریان گره موجود در این نرم‌افزارها، نتایج متفاوتی برای جریان و هد در دسترس گره‌ها حاصل می‌شود و از آنجایی که در آنالیز فازی هدف پیدا کردن حدود کمینه

در این شبکه ز شماره گره، X شماره لوله و C شماره حلقه یا مدار اصلی است.

$$\sum_{X \in j} (Q_X)_{\alpha=\alpha^*} + q_j = 0 \quad (۵)$$

$$\sum_{X \in c} \frac{10.68 L_X (Q_X^{1.852})_{\alpha=\alpha^*}}{(C_{HW})_{\alpha=\alpha^*} D_X^{4.87}} = 0 \quad (۶)$$

که برای FNFA تحت شرایط کمبود فشار، q_j در فرمول ۵ به q_j^{avl} (جریان گره در دسترس) تغییر می‌کند و مقدار آن به هد در دسترس H_j^{avl} وابسته خواهد بود. این وابستگی با معادلات (۷) تا (۹)، که از تحقیق واگنر و همکاران (۱۹۸۸) استخراج شده، مشخص شده است.

$$(q_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} = 0, \quad \text{if } (H_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} \leq H_j^{min} \quad (۷)$$

$$\begin{cases} (q_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} = (q_j^{req})_{\alpha=\alpha^*} \left(\frac{(H_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} - H_j^{min}}{H_j^{des} - H_j^{min}} \right)^{1/n_j}, \\ \text{if } H_j^{min} < (H_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} < H_j^{des} \\ (q_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} = (q_j^{req})_{\alpha=\alpha^*}, \\ \text{if } (q_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} > (q_j^{req})_{\alpha=\alpha^*} \end{cases} \quad (۸)$$

$$(q_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} = (q_j^{req})_{\alpha=\alpha^*}, \text{ if } (H_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} \geq H_j^{des} \quad (۹)$$

در این معادلات H_j^{avl} هد در دسترس هر گره، q_j^{req} تقاضای مورد نیاز گره z از H_j^{des} هد مورد نیاز (یا مطلوب) گره z ، H_j^{min} و H_j^{max} حداقل و حداکثر هدی که در گره z ممکن است ایجاد شود و $n_j = 1.5$ است (گوپتا و بیهو، ۱۹۹۶).

مدل بهینه‌سازی (حداقل کردن اختلاف ارتفاع فشار در دسترس با ارتفاع فشار به دست آمده از EPANET مطابق با معادلات (۱۰) تا (۱۵) است که برای حل معادلات شبکه در حالت تحلیل مبتنی بر فشار، با فازی در نظر گرفتن ضرایب زبری لوله‌ها در نظر گرفته شده است:

$$z = \text{Min}(\sum_{j=1}^J (H_j^{EPA} - H_j^{avl})^2)_{\alpha=\alpha^*} \quad (۱۰)$$

$$H_{1 \times J}^{avl} = [H_1^{avl} \ H_2^{avl} \ \dots \ H_j^{avl} \ \dots \ H_J^{avl}]_{\alpha=\alpha^*} \quad (۱۱)$$

$$H_j^{min} \leq (H_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} \leq H_j^{max} \quad (۱۲)$$

$$(q_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} = PDR(H_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} \quad (۱۳)$$

$$(C_{HWX}^{min})_{\alpha=\alpha^*} \leq C_{HW} \leq (C_{HWX}^{max})_{\alpha=\alpha^*} \quad (۱۴)$$

$$[H_1^{EPA} \ H_1^{EPA} \ \dots \ H_j^{EPA} \ \dots \ H_J^{EPA}]_{\alpha=\alpha^*} =$$

$$EPANET(q_1^{avl} \ q_2^{avl} \ \dots \ q_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*} \quad (۱۵)$$

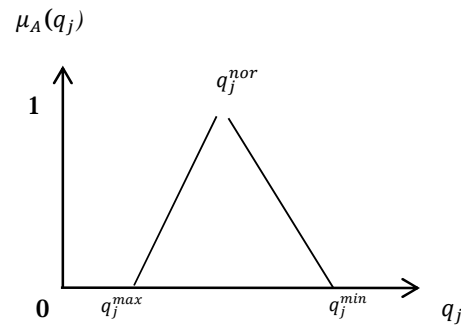
در این معادلات z تابع هدف، J تعداد گره‌های تقاضا در شبکه، معادله (۱۱) بردار متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله

و بیشینه این مقادیر در هر سطح عدم قطعیت است، نتایج تحقیق حاضر نیز می‌تواند تصویر روشنی از عملکرد شبکه تحت شرایط کمبود فشار به خصوص در زمان شکست لوله‌ها ارائه کند.

مواد و روش‌ها

تابع عضویت برای پارامترهای فازی

بیشترین نوع توابع عضویت برای پارامترهای فازی ۱- مثلثی و ۲- دوزنقه‌ای هستند. در این تحقیق از تقاضای فازی مثلثی شکل ۱ استفاده شده که حداقل، بیشترین احتمال وقوع (نرمال) و حداکثر مقادیر تقاضای گره‌ها را بیان می‌کند. توابع عضویت مثلثی با استفاده از معادلات (۱) تا (۴) به دست می‌آیند.



شکل ۱- توابع عضویت مثلثی برای تقاضای گره‌ها

$$\mu_A(q_j) = 0, \quad q_j \leq q_j^{min} \quad (۱)$$

$$\mu_A(q_j) = \frac{q_j - q_j^{min}}{q_j^{nor} - q_j^{min}}, \quad q_j^{min} \leq q_j \leq q_j^{nor} \quad (۲)$$

$$\mu_A(q_j) = \frac{q_j - q_j^{max}}{q_j^{nor} - q_j^{max}}, \quad q_j^{nor} \leq q_j \leq q_j^{max} \quad (۳)$$

$$\mu_A(q_j) = 0, \quad q_j \geq q_j^{max} \quad (۴)$$

که در آن μ_A تابع عضویت و q_j^{min} و q_j^{nor} و q_j^{max} تقاضاهای حداقل، نرمال و حداکثر در گره z و q_j تقاضا در گره z که بین q_j^{min} و q_j^{max} قرار دارد، است.

فرمول‌بندی مسئله برای FNFA و FDDA

با فازی در نظر گرفتن ضرایب زبری هیزن ویلیامز (C_{HW}) و تخصیص $\alpha = \alpha^*$ (سطح امکان‌پذیری) به C_{HW} همه لوله‌ها، تحت شرایط FDDA، معادلات تداوم جریان گره برای تقاضای گره‌ها و معادلات افت-ارتفاع فشار حلقه برای حلقه‌ها به ترتیب به صورت معادلات (۵) و (۶) نوشته می‌شود:

۳- تنظیم مقادیر مستقل فازی با توجه به تأثیرشان بر روی مقادیر وابسته فازی برای ورود به شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET (برای مثال با فازی در نظر گرفتن تقاضای گره‌ها (q_j^{req}) ، به‌منظور به‌دست‌آوردن مقادیر حداکثر q_j^{avl} بایستی حدود بالای متعلق به تقاضای گره‌ها (یا به‌عبارتی q_j^{req}) مربوط به هر $\alpha - cut$ وارد شبیه‌ساز هیدرولیکی شود.

۴- استفاده از روابط ۷ تا ۹ برای به‌دست‌آوردن دبی در دسترس $(q_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*}$ در $\alpha - cut$ مربوط.

۵- آنالیز هیدرولیکی با مقادیر به‌دست‌آمده $(q_j^{avl})_{\alpha=\alpha^*}$ از گام قبل، با استفاده از نرم‌افزار EPANET معادله (پ۵) و به‌دست‌آوردن مقادیر هد در گره‌ها $((H_j^{EPA})_{\alpha=\alpha^*})$ در $\alpha - cut$ مربوط.

۶- تعیین برازندگی هر کروموزوم (معادله (۱۰)).

۷- اعمال عملگر انتخاب، ترکیب و جهش برای ایجاد نسل بعد.

۸- تکرار گام‌های ۴ تا ۷ برای چندین نسل مشخص. پارامترهای تنظیم‌شده GA برای حل مسئله تحقیق حاضر عبارت‌اند از جمعیت اولیه (۱۶۰)، جمعیت نسل‌های بعد (۸۰)، احتمال ترکیب (۰/۹)، احتمال جهش (جهش خطی از ۰/۰۵ تا ۰/۰۱)، انتخاب (مرتب‌بندی)، ترکیب (یکنواخت)، تعداد بیت‌های مربوط به هر کروموزوم (۴) و نوع GA (باینری). تولید جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انجام می‌شود.

نتایج و بحث

شبکه نمونه اول

شبکه شکل ۲ از تحقیق اسپیلیوتیس و تساکریس (۲۰۱۲) استخراج شده است. در محل گره یک، منبع قرار گرفته و گره‌های ۲ تا ۱۱ گره‌های تقاضا هستند. تقاضای آب در هر گره به‌عنوان یک عدد مثلثی فازی متقارن در نظر گرفته شده است. مشخصات شبکه در جدول ۱ درج شده است. عدم قطعیت در تقاضای آب ۱۵ درصد و مقادیر C_{HW} برای لوله‌های پلی‌اتیلن (بدون هیچ عدم قطعیتی) ۱۴۰ در نظر گرفته شده است. هد هیدرولیکی کل در گره مخزن ۲۰۰ متر است. فشار مطلوب در هر گره برای اینکه تقاضای نرمال در گره‌ها وجود داشته باشد، ۳۰ متر بالای

هد در دسترس گره‌ها) است که حدود بالا و پایین این متغیرها در الگوریتم ژنتیک براساس معادله (۱۲) مشخص می‌شود. معادله (۱۳) همان معادلات (۷) تا (۹) هستند که به اختصار این‌گونه نمایش داده شده‌اند که PDR نمایانگر وابستگی جریان گره به هد دسترس است. معادله (۱۴) محدودیت مربوط به ضریب زبری (به‌دلیل غیرقطعی بودن آن) بوده و تابع EPANET نیز شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET را نشان می‌دهد که هد به‌دست‌آمده از این تابع با H^{EPA} نشان داده شده است.

نتایج حاصل از مشاهدات گوپتا و بیهو (۲۰۰۷) در رابطه با تأثیر تغییر پارامترهای مستقل روی پارامترهای وابسته (هد گره‌ها، دبی لوله‌ها و ...) به‌صورت زیر است:

۱) حداکثر مقادیر پارامترهای وابسته وقتی اتفاق می‌افتد که پارامترهای مستقل فازی مقادیر مرزیشان (حدود بالا یا پایین‌شان) را داشته باشند که این موجب می‌شود محدودیت‌های نابرابری (معادله (۱۴)) به محدودیت‌های متناوب (معادله (۱۵)) تغییر کنند.

$$C_{HWX} = (C_{HWX}^{min})_{\alpha=\alpha^*} \text{ or } C_{HWX} = (C_{HWX}^{max})_{\alpha=\alpha^*} \quad (16)$$

۲) اگر یکی از حدود مقادیر پارامترهای فازی مستقل مقدار حداکثر (یا حداقل) پارامترهای فازی وابسته را بدهد حد دیگر آن مقدار حداقل (یا حداکثر) پارامترهای فازی وابسته را نتیجه می‌دهد.

تئوری و فرایند

آنالیز فازی جریان شبکه (FNFA) شامل خروجی گره به‌عنوان یک پارامتر وابسته اضافی است. خروجی در شرایط کمبود فشار گره‌ها با تغییر تقاضای گره‌ها و ضرایب زبری لوله‌ها مشاهده شد که به‌طور یکنواخت تغییر می‌کند. با توجه به این مسئله گام‌های زیر در شرایط فازی بودن تقاضای گره‌ها برای به‌دست‌آوردن حداکثر مقادیر q_j^{avl} که منجر به پیداشدن H_j^{avl} حداقل خواهد شد، انجام می‌گیرد:

۱- تشکیل مجموعه فازی برای پارامترهای ورودی (q_j^{req}) به فرم تابع عضویت مثلثی (شکل ۱) با لحاظ ۵ سطح امکان‌پذیری (۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱) $(\alpha - cut = 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0)$.

۲- ایجاد جمعیت اولیه به‌طور تصادفی (که حدود بالا و پایین متغیرها H_j^{avl} در کروموزوم برابر با H_j^{min} و H_j^{max} است).

و براین اساس FNFA انجام گرفته است و نتایج برای تعدادی از گره‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. برای خروجی اضافی در هر گره نیاز به افزایش فشار است (آگراوال و همکاران، ۲۰۰۷). هد فشاری مورد نیاز برای (H_j^{req}) برای فراهم شدن تقاضای مورد نیاز از روابط ۱۷ و ۱۸ به دست می‌آید.

$$H_j^{req} = H_j^{min} + S_j (q_j^{req})^{n_j} \quad (17)$$

$$S_j = (H_j^{des} - H_j^{min}) / (q_j^{nor})^{n_j} \quad (18)$$

نتایج زیر از شکل‌های ۳ و ۴ استخراج شده‌اند:

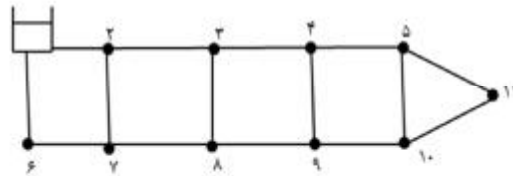
۱) حداقل توزیع مقادیر هدهای فشاری در دسترس در شکل ۴ در همه گره‌ها در مقایسه با شکل ۳ بالاتر است. برای نمونه حداقل مقادیر H_5 در شکل ۳ برابر با $166/82$ متر است؛ در حالی که هد فشاری در دسترس همان گره در شکل ۴ با مدل تحقیق حاضر برابر با $171/74$ متر است که بیانگر این است FDDA تحت شرایط کمبود فشار کمبود بیشتری در هد گره‌ها نشان می‌دهد.

۲) کمبود در هدهای فشاری در دسترس گره‌های ۵، ۹ و ۱۰ در $\alpha - cut = 1$ در هر دو شکل ۳ و ۴ مشاهده شده است. با کاهش در $\alpha - cut$ حداقل مقادیر هد در دسترس گره‌ها کاهش می‌یابد. با FDDA در شکل ۳ کمبود هد در دسترس گره ۱۱ (یعنی $H_{11} < 165$) در شروع کمبود در جریان خروجی و هد فشاری در دسترس این گره در $\alpha - cut = 0.2$ نمایانگر می‌شود (با FNFA (شکل ۴) تقاضا و هد در دسترس برای گره ۱۱ در $\alpha - cut = 0.6$ و همچنین در $\alpha - cut = 0.4$ رضایت‌بخش هستند).

۳) در شکل ۴ حداقل تقاضا (در $\alpha - cut = 0$) برای همه گره‌ها به جز گره ۱۰ (حداقل جریان در دسترس $q_{10} = 21.04$ برخلاف مقدار مورد نیاز آن $1/s$ $21/25$ است) رضایت‌بخش است. این نشان می‌دهد که عملکرد شبکه حتی وقتی همه گره‌ها کمترین مقدار تقاضا را نیاز دارند، رضایت‌بخش نیست.

همان‌گونه که در شکل‌های ۳ و ۴ مشخص است نتایج تحقیق حاضر و روش گوپتا و همکاران (۲۰۱۴) به هم نزدیک بوده و اختلاف جزئی با نتایج نرم‌افزار WaterNetGen به دلیل تفاوت رابطه ارتفاع فشار-جریان است.

سطح زمین است و فشار حداقل برابر با صفر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- شبکه توزیع آب حلقوی (شبکه نمونه اول)

آنالیز جریان گره NFA و آنالیز وابسته به تقاضا DDA

DDA تعیین می‌کند که آیا شبکه برای رویارویی با مقادیر نرمال تقاضا رضایت‌بخش است یا خیر. سطح گرادیان هیدرولیکی (HGL) در دسترس در گره‌های تقاضا برای مقادیر نرمال تقاضا در ستون ۴ جدول ۲ (که از آنالیز هیدرولیکی شبکه با EPANET به دست آمده‌اند) نشان داده شده است. با مقایسه فشار در دسترس (ستون ۴) با فشار مطلوب (ستون ۳) یک کمبود در هد فشاری گره‌های ۵، ۹ و ۱۰ مشخص خواهد شد؛ بنابراین شبکه برای تقاضاهای نرمال دچار کمبود فشار است. به منظور صحت‌سنجی مدل توسعه داده شده، مقادیر تقاضای در دسترس (q_j^{avl}) و هد در دسترس گره‌ها (H_j^{avl}) حاصل از NFA، با استفاده از مدل گوپتا و همکاران (۲۰۱۴) و مدل تحقیق حاضر به ترتیب در ستون‌های ۵ تا ۸ جدول ۲ ثبت شده‌اند. با توجه به جدول ۲ با وجود کمبود فشار گره‌های ۵، ۹ و ۱۰ تقاضای گره‌ها تا حدی رضایت‌بخش است.

آنالیز فازی جریان گره (FNFA) و آنالیز فازی وابسته به تقاضا (FDDA)

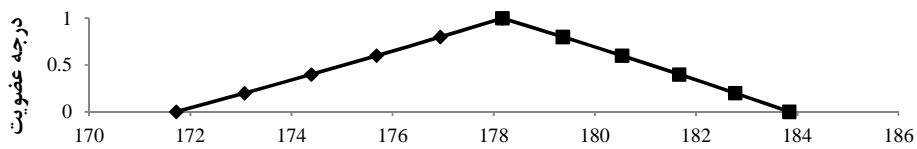
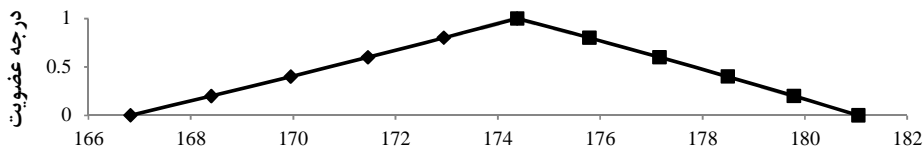
برای شبکه شکل ۲ در ابتدا FDDA با استفاده از روش تأثیر گوپتا و بیهو (۲۰۰۷) با فرض اینکه تقاضای گره‌ها به طور کامل رضایت‌بخش باشد، انجام شده و توابع عضویت برای تنها تعداد کمی از هد گره‌ها H_5 ، H_9 ، H_{10} و H_{11} در شکل ۳ نشان داده شده است. در مرحله بعد، برای این شبکه فشار ۳۰ متر بالای سطح زمین برای رویارویی گره‌ها با تقاضای نرمال کافی در نظر گرفته شده

جدول ۱- مشخصات شبکه توزیع آب شبکه نمونه ۱

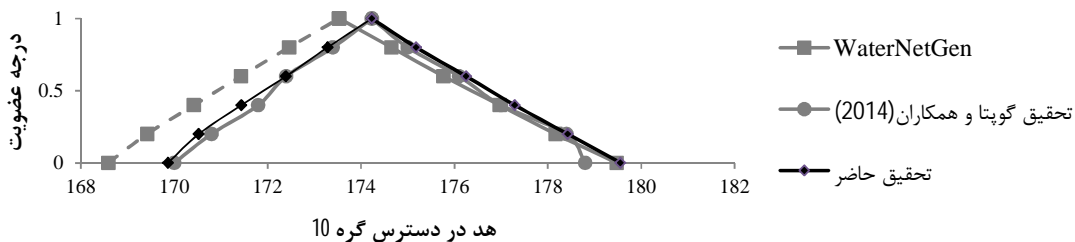
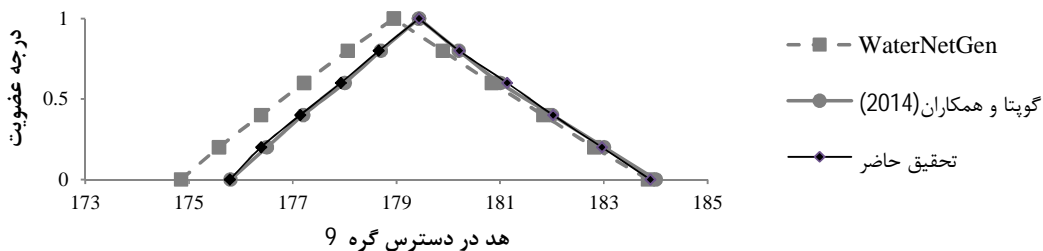
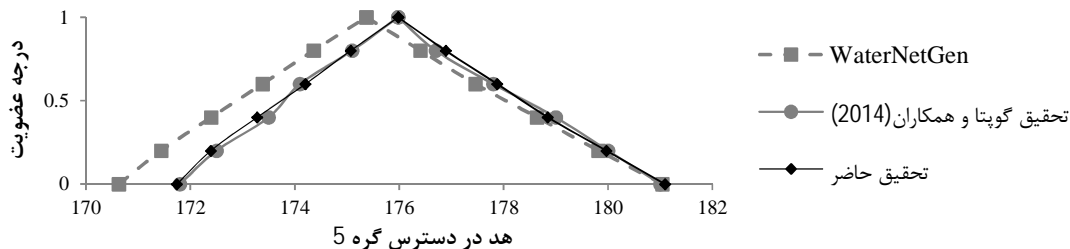
شماره لوله	گره ابتدا	گره انتها	طول (m)	قطر (mm)	شماره گره	تقاضای آب (L/s)			ارتفاع (m)
						حداقل	نرمال	حداکثر	
۱	۱	۲	۸۰۰	۳۵۲/۶	۲	۲۵/۵	۳۰	۳۴/۵	۱۴۲
۲	۲	۳	۸۰۰	۳۱۲/۸	۳	۲۱/۲۵	۲۵	۲۸/۷۵	۱۴۵
۳	۳	۴	۸۰۰	۲۷۷/۶	۴	۲۵/۵	۳۰	۳۴/۵	۱۴۴
۴	۴	۵	۸۰۰	۱۹۸/۲	۵	۲۱/۲۵	۲۵	۲۸/۷۵	۱۴۹
۵	۵	۱۱	۱۴۰۰	۱۷۶/۲	۶	۲۱/۲۵	۲۵	۲۸/۷۵	۱۴۱
۶	۱	۶	۱۲۰۰	۳۱۲/۸	۷	۲۱/۲۵	۲۵	۲۸/۷۵	۱۴۲
۷	۶	۷	۸۰۰	۳۱۲/۸	۸	۲۱/۲۵	۲۵	۲۸/۷۵	۱۴۰
۸	۷	۸	۸۰۰	۲۴۶/۸	۹	۲۱/۲۵	۲۵	۲۸/۷۵	۱۵۰
۹	۸	۹	۸۰۰	۲۲۰/۴	۱۰	۲۱/۲۵	۲۵	۲۸/۷۵	۱۵۰
۱۰	۹	۱۰	۸۰۰	۱۹۸/۲	۱۱	۳۴	۴۰	۴۶	۱۳۵
۱۱	۱۰	۱۱	۱۴۰۰	۱۷۶/۲					
۱۲	۲	۷	۱۲۰۰	۲۲۰/۴					
۱۳	۲	۸	۱۲۰۰	۱۲۳/۴					
۱۴	۴	۹	۱۲۰۰	۱۱۰/۲					
۱۵	۵	۱۰	۱۲۰۰	۱۱۰/۲					

جدول ۲- نتایج آنالیز شبکه برای تقاضاهای نرمال

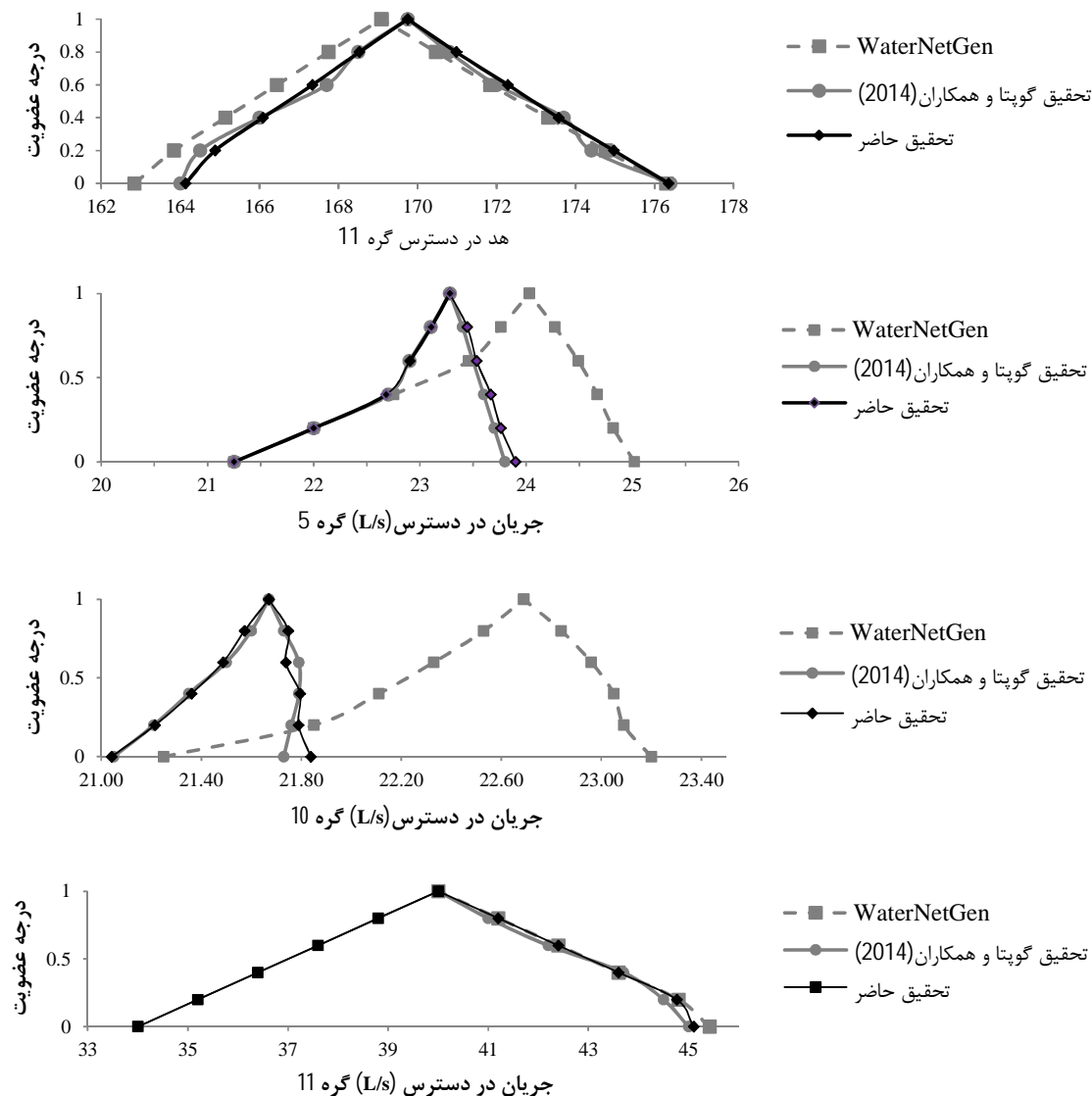
a-cut=1										
شماره گره	اطلاعات شبکه		EPANET با DDA		NFA (تحقیق گوپتا و همکاران (۲۰۱۴))		NFA (تحقیق حاضر)		آنالیز وابسته به فشار WaterNetGen	
	تقاضا	HGL مطلوب	HGL	در دسترس	HGL	در دسترس	HGL	در دسترس	HGL	در دسترس
۲	۳۰	۱۷۲	۱۹۴/۳۲	۳۰/۰۰	۱۹۴/۵۳	۳۰/۰۰	۱۹۴/۵۳	۳۰/۰۰	۱۹۴/۴۵	۳۰/۰۰
۳	۲۵	۱۷۵	۱۸۹/۲۱	۲۵/۰۰	۱۸۹/۶۵	۲۵/۰۰	۱۸۹/۶۵	۲۵/۰۰	۱۸۹/۴۸	۲۵/۰۰
۴	۳۰	۱۷۴	۱۸۴/۰۸	۳۰/۰۰	۱۸۴/۸۲	۳۰/۰۰	۱۸۴/۸۲	۳۰/۰۰	۱۸۴/۵۴	۳۰/۰۰
۵	۲۵	۱۷۹	۱۷۴/۳۸	۲۳/۲۹	۱۷۵/۹۷	۲۳/۲۹	۱۷۵/۹۷	۲۳/۲۸	۱۷۵/۳۷	۲۴/۰۳
۶	۲۵	۱۷۱	۱۹۴/۳۹	۲۵/۰۰	۱۹۴/۵۸	۲۵/۰۰	۱۹۴/۵۸	۲۵/۰۰	۱۹۴/۵۱	۲۵/۰۰
۷	۲۵	۱۷۲	۱۹۲/۱۸	۲۵/۰۰	۱۹۲/۴۷	۲۵/۰۰	۱۹۲/۴۷	۲۵/۰۰	۱۹۲/۳۶	۲۵/۰۰
۸	۲۵	۱۷۰	۱۸۵/۳۵	۲۵/۰۰	۱۸۶/۰۲	۲۵/۰۰	۱۸۶/۰۲	۲۵/۰۰	۱۸۵/۷۶	۲۵/۰۰
۹	۲۵	۱۸۰	۱۷۸/۱۷	۲۴/۶۸	۱۷۹/۴۳	۲۴/۶۸	۱۷۹/۴۳	۲۴/۶۸	۱۷۸/۹۵	۲۵/۰۰
۱۰	۲۵	۱۸۰	۱۷۲/۲۷	۲۱/۶۸	۱۷۴/۲۳	۲۱/۶۸	۱۷۴/۲۳	۲۱/۶۷	۱۷۳/۵۳	۲۲/۶۹
۱۱	۴۰	۱۶۵	۱۶۷/۹۶	۴۰/۰۰	۱۶۹/۷۵	۴۰/۰۰	۱۶۹/۷۵	۴۰/۰۰	۱۶۹/۰۹	۴۰/۰۰



شکل ۳- توابع عضویت فازی برای هد در دسترس گره‌ها با در نظر گرفتن آنالیز فازی وابسته به تقاضا (FDDA) - شبکه نمونه اول



شکل ۴- توابع عضویت فازی هد در دسترس و جریان خروجی گره‌ها با آنالیز فازی وابسته به جریان (FNFA) - شبکه نمونه اول

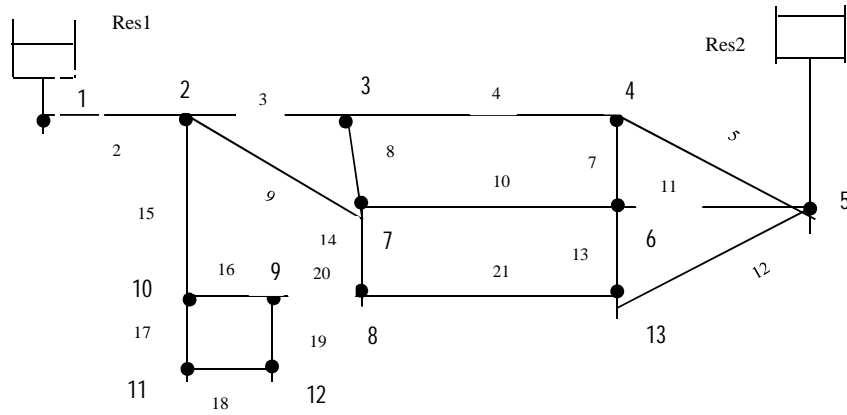


ادامه شکل ۴- توابع عضویت فازی هد در دسترس و جریان خروجی گره‌ها با آنالیز فازی وابسته به جریان (FNFA) - شبکه نمونه اول

MATLAB انجام می‌شود که حالت شکست لوله در شبکه را با دستور `setdata ('EN_INITSTATUS',VALU)` می‌توان تعیین کرد که VALU ماتریسی متشکل از اعداد صفر (نبود لوله یا شکست آن در شبکه) و ۱ (وجود لوله یا کارکرد آن در شبکه) است. با توجه به نتایج به دست آمده برای شبکه نمونه دوم، مقادیر جریان خروجی گره‌ها با نرم‌افزار WaterGenNet نسبت به دو مدل دیگر کمتر بوده و هد در دسترس خروجی نرم‌افزار بیشتر است؛ اما مقادیر حاصل از تحقیق حاضر و سريتو و گوپتا (۲۰۲۰) به هم نزدیک است.

شبکه نمونه دوم

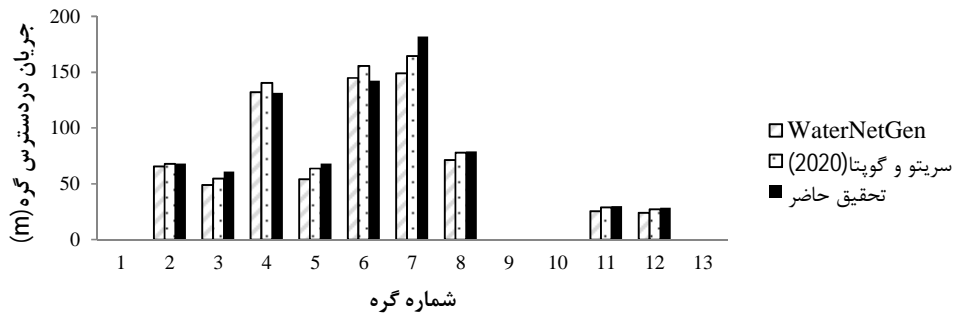
مدل توسعه داده شده همچنین برای شبکه شکل ۵ (که قبلاً توسط سريتو و گوپتا (۲۰۲۰) در شرایط شکست یکی از لوله‌ها (لوله ۳) و با ۱۵ درصد عدم قطعیت در تقاضای نرمال بررسی شده است)، اجرا و نتایج آن در جدول ۴ ثبت شده است و به صورت نمودار در شکل‌های ۶ و ۷ نیز نمایش داده شده است. فشار مطلوب برای رویارویی گره‌ها با تقاضای نرمال کافی ۱۵ متر است و فشار حداقل برابر با صفر در نظر گرفته شده است. مشخصات شبکه نیز در جدول ۳ درج شده است. در مدل توسعه داده شده، پس از فراخوانی فایل شبکه با فرمت `inp`، آنالیز هیدرولیکی شبکه با مدل برنامه‌نویسی شده EPANET در محیط



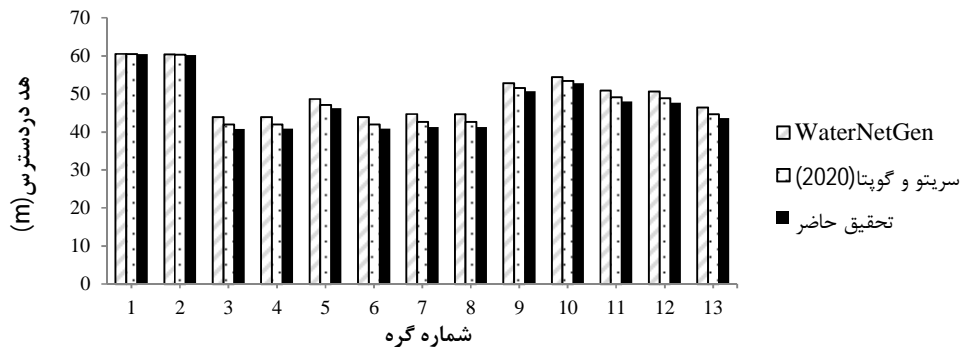
شکل ۵- یک شبکه توزیع آب حلقوی (شبکه نمونه دوم)

جدول ۳- مشخصات شبکه توزیع آب شبکه نمونه دوم

شماره لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	
طول (m)	۶۰۹/۶	۲۴۳/۸	۱۵۲۴/۰۰	۱۱۲۷/۷۶	۱۱۸۸/۷۲	۶۴۰/۰۸	۷۶۲/۰۰	۹۴۴/۸۸	۱۶۷۶/۴	۸۸۳/۹۲	
قطر (mm)	۷۶۲	۷۶۲	۶۰۹	۶۰۹	۴۰۶	۴۰۶	۲۵۴	۲۵۴	۳۸۱	۳۰۵	
ضریب همزن ویلیامز	۱۳۰	۱۲۸	۱۲۶	۱۲۴	۱۲۲	۱۲۰	۱۱۸	۱۱۶	۱۱۴	۱۱۲	
شماره لوله	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱
طول (m)	۸۸۳/۹۲	۱۳۷۱/۶	۷۶۲/۰۰	۸۲۲/۹۶	۹۴۴/۸۸	۵۷۹/۰۰	۴۸۷/۶۸	۴۵۷/۲	۵۰۲/۹۲	۸۸۳/۹۲	۹۴۴/۸۸
قطر (mm)	۳۰۵	۳۸۱	۲۵۴	۲۵۴	۳۰۵	۳۰۵	۲۰۳	۱۵۲	۲۰۳	۲۰۳	۳۰۵
ضریب همزن ویلیامز	۱۱۰	۱۰۸	۱۰۶	۱۰۴	۱۰۲	۱۰۰	۹۸	۹۶	۹۴	۹۲	۹۰



شکل ۶- جریان در دسترس گره‌ها با در نظر گرفتن آنالیز فازی وابسته به جریان (FNFA) برای شبکه نمونه دوم



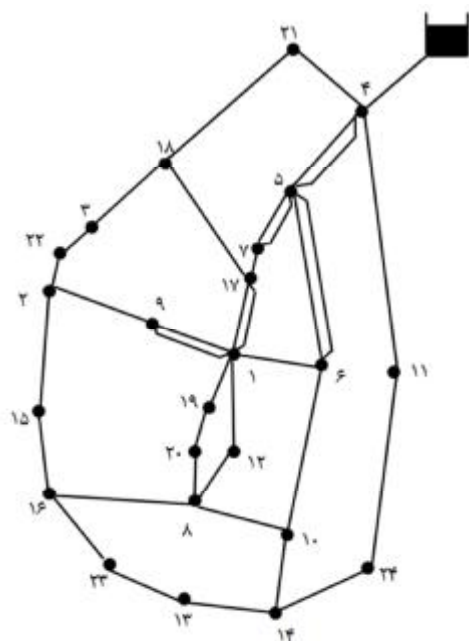
شکل ۷- هد در دسترس گره‌ها با در نظر گرفتن آنالیز فازی وابسته به جریان (FNFA) برای شبکه نمونه دوم

جدول ۴- نتایج حاصل از آنالیز جریان گره در شرایط شکست لوله سوم برای شبکه نمونه دوم

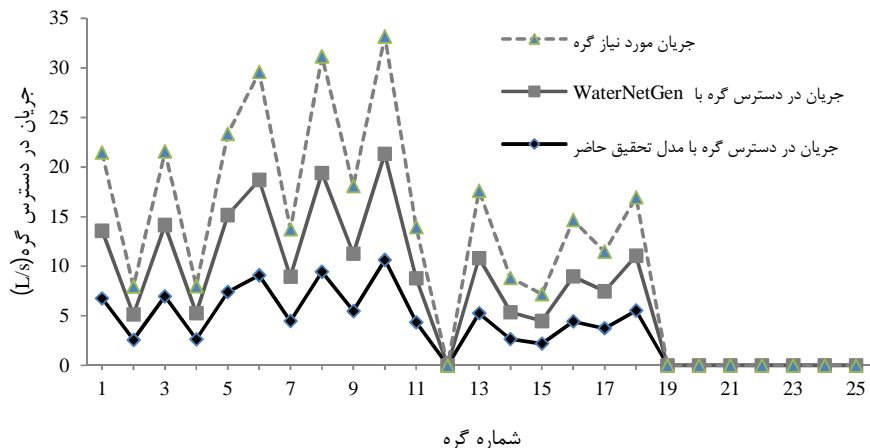
شماره گره	ارتفاع	تقاضای نرمال	تقاضای نرمال	هد مورد نیاز	هد موجود	هد در دسترس (DDA)	سریتو و گوپتا (۲۰۲۰)		WaterNetGen		تحقیق حاضر	
							HGL در دسترس	جریان در دسترس	HGL در دسترس	جریان در دسترس	HGL در دسترس	جریان در دسترس
(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)	(۷)	(۸)	(۹)	(۱۰)	(۱۱)	(۱۲)	(۱۳)
RES1	۶۰/۹۶	۰/۰	۰/۰	۶۰/۹۶	۶۰/۹۶	۶۰/۹۶	۰/۰	۶۰/۹۶	۰/۰	۶۰/۹۶	۰/۰	۶۰/۹۶
RES2	۶۰/۹۶	۰/۰	۰/۰	۶۰/۹۶	۶۰/۹۶	۶۰/۹۶	۰/۰	۶۰/۹۶	۰/۰	۶۰/۹۶	۰/۰	۶۰/۹۶
۱	۲۷/۴۳	۰/۰	۰/۰	۴۲/۴۳	۴۲/۴۳	۶۰/۲۲	۰/۰	۶۰/۵۴	۰/۰	۶۰/۴۹	۰/۰	۶۰/۴۶
۲	۳۳/۵۳	۵۹	۵۹	۴۸/۵۳	۴۸/۵۳	۵۹/۹۱	۶۷/۸۵	۶۵/۷۸	۶۷/۸۵	۶۰/۳۰	۶۷/۸۵	۶۰/۲۵
۳	۲۸/۹۶	۵۹	۵۹	۴۳/۹۶	۴۳/۹۶	۲۶/۹۸	۶۷/۸۵	۴۳/۹۲	۶۱/۰۴	۴۱/۹۱	۴۳/۹۲	۴۰/۷۷
۴	۳۲	۱۷۸	۱۷۸	۴۷	۴۷	۲۷/۰۲	۲۰۴/۷	۱۳۲/۴۳	۱۳۱/۴۹	۴۱/۹۵	۴۳/۹۵	۴۰/۸۲
۵	۳۰/۴۸	۵۹	۵۹	۴۵/۴۸	۴۵/۴۸	۳۶/۸۰	۶۳/۸۳	۵۴/۱۹	۶۷/۸۵	۴۷/۱۲	۴۸/۶۹	۴۶/۲۳
۶	۳۱/۳۹	۱۹۰	۱۹۰	۴۶/۳۹	۴۶/۳۹	۲۷/۰۶	۲۱۸/۵	۱۴۴/۹۷	۱۴۲/۳۲	۴۱/۹۵	۴۳/۹۶	۴۰/۸۷
۷	۲۹/۵۶	۱۷۸	۱۷۸	۴۴/۵۶	۴۴/۵۶	۲۸/۹۲	۲۰۴/۷	۱۴۹/۰۷	۱۸۱/۸۵	۴۲/۶۸	۴۴/۷	۴۱/۳۱
۸	۳۱/۳۹	۹۱	۹۱	۱۰۴/۶۵	۴۶/۳۹	۲۸/۸۳	۱۰۴/۶۵	۷۱/۳۸	۷۹/۰۹	۴۲/۶۵	۴۴/۶۷	۴۱/۲۸
۹	۳۲/۶۱	۰/۰	۰/۰	۴۷/۶۱	۴۷/۶۱	۴۵/۴۶	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۵۱/۵۷	۵۲/۸۲	۵۰/۷۰
۱۰	۳۴/۱۴	۰/۰	۰/۰	۴۹/۱۴	۴۹/۱۴	۴۸/۶۷	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۵۳/۴۴	۵۴/۴۷	۵۲/۷۵
۱۱	۳۵/۰۵	۳۰	۳۰	۳۴/۵۰	۵۰/۰۵	۴۲/۱۶	۳۴/۵۰	۲۵/۷۰	۲۹/۸۸	۴۹/۱۶	۵۰/۸۹	۴۸/۰۲
۱۲	۳۶/۵۸	۳۰	۳۰	۳۴/۵۰	۵۱/۵۸	۴۱/۴۹	۳۴/۵۰	۲۴/۲۱	۲۸/۶۹	۴۸/۹۲	۵۰/۶۴	۴۷/۶۹
۱۳	۳۳/۵۳	۰/۰	۰/۰	۴۸/۵۳	۴۸/۵۳	۳۲/۳۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴۴/۶۷	۴۶/۴۶	۴۳/۵۹

مطالعه موردی

مدل تحقیق حاضر برای شبکه توزیع آب شهر جنگل (واقع در استان خراسان رضوی) با هد مطلوب ۳۰ متر و با در نظر گرفتن ۳۰ درصد عدم قطعیت در مقادیر نرمال تقاضای مورد نیاز نیز اجرا شده و نتایج به دست آمده به صورت نمودارهای شکل ۸ و ۹ نمایش داده شده است. همان گونه که در نمودارها مشخص است ۳۰ درصد عدم قطعیت در مقادیر تقاضا موجب شده که دیگر در هیچ گره‌ای تقاضای مورد نیاز تأمین نشود.



شکل ۸- شبکه توزیع آب شهر جنگل



شکل ۹- جریان در دسترس گره‌ها با در نظر گرفتن آنالیز فازی وابسته به جریان (FNFA) برای شبکه شهر جنگل

نتیجه‌گیری

به‌منظور فراهم‌سازی یک سیستم قابل‌اطمینان و ایمن، تخمین عدم قطعیت‌های آن سیستم از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق از آنالیز فازی برای کمی‌سازی ابهامات شبکه توزیع آب استفاده شد و برای پیداکردن محدوده پاسخ‌های (پارامترهای وابسته) سیستم از یک مدل بهینه‌سازی استفاده شد، به گونه‌ای که در این مدل نیازی به یکنواخت‌بودن ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته نیست. نهایتاً سیستم هیدرولیکی با آنالیز جریان گره (FNFA)، با هدف حفظ روابط بین تقاضا و هد گره تحت شرایط کمبود فشار تحلیل شد. نتایج نشان داد FNFA نتایج روشن‌تری را در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر تحت شرایط کمبود فشار به‌دست می‌دهد. همچنین استفاده از کمبود تأمین آب در کمی‌سازی اطمینان‌پذیری و اطمینان‌پذیری بر پایه طراحی شبکه‌های توزیع آب می‌تواند جست‌وجو شود.

منابع

- گرانمهر م.، چمنی م. و اصغری ک. ۱۳۹۷. تحلیل مبتنی بر فشار در شبکه‌های توزیع آب به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۲۲(۳): ۴۳-۵۳.
- Abdy Sayyed M. A. H. and Gupta R. 2013. Predicting deficient condition performance of water distribution networks. *J. Civil Eng. Infrastructures*. 46(2): 161-173.
- Agrawal M. L. Gupta R. and Bhav P. R. 2007. Optimal design of level-1 redundant water distribution networks considering nodal storage. *J. Environ. Engg.* 133(3): 319-330.
- Bhave P. R. 1981. Node flow analysis of water distribution systems. *J. Transportation Engineering, ASCE*. 107(4): 457-467.
- Branisavljevic N. and Ivetic M. 2006. Fuzzy approach in the uncertainty analysis of the water distribution network of Becej. *J. Civil Eng. Environ. Syst.* 23(3): 221-236.
- Ciaponi C. and Creaco E. 2018. Comparison of Pressure-Driven Formulations for WDN Simulation. Article in water, MDPI. pp. 1-14.
- Germanopoulos G. 1985. A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. *Civ Eng Syst.* 2(3): 171-179.
- Gupta R. and Bhav P. R. 1996. Comparison of methods for predicting deficient network performance. *J. Water Resour. Plan and manage.* 122(3): 214-217.
- Gupta R. and Bhav P. R. 2007. Fuzzy parameters in pipe network analysis. *J. Civil Eng. Environ. Syst.* 24(1): 33-54.
- Gupta R. Harkutiya J. Dongre Sh. and Ormsbee L. 2014. Fuzzy Analysis of Pressure-Deficient Water Distribution Networks. *World Environmental and Water Resources Congress*. 435-444.
- Rao V. R. 2016. Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 7: 19-34.
- Revelli R. and Ridolfi L. 2002. Fuzzy approach for analysis of pipe networks. *J. of Hydraulic Engg.* 128(1): 93-101.
- Shibu A. and Reddy M. J. 2011. Uncertainty analysis of water distribution networks by

- fuzzy-cross entropy approach. World Academy of Science, Engg. and Tech., 59: 724-731.
14. Sharoonizadeh Sh. Mamizadeh J. and Sarvarian J. 2016. Comparison of solution methods for analyzing water distribution networks under pressure deficient conditions. *Journal of Water Supply and Research and Technology*. 65(4): 330-341.
 15. Spiliotis M. and Tsakiris G. 2012. Water distribution networks analysis under fuzzy demands. *J. Civil Eng. Environ. Syst.* 29(2): 107-122.
 16. Sreethu S. and Gupa R. 2020. Fuzzy node flow analysis of water distribution networks using Jaya algorithm. 5th international conference on modeling and simulation in civil engineering.
 17. Tanyimboh T. T. and Templeman A. B. 2010. Seamless Pressure-Deficient Water Distribution System Model. *J. Water Manage.* 163: 215-224.
 18. Vaidya Deepali R. and Mali Sandip T. 2019. Pressure driven approach in water distribution network analysis: A Review. *The International journal of analytical and experimental modal analysis*. ISSN NO: 0886-9367.
 19. Wagner J. M. Shamir U. and Marks D. H. 1988. Water distribution reliability: Simulation methods. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 114(3): 276-294.