بررسی تأثیر عدم قطعیت توأم نیاز گره‌ها و زبری لوله‌ها در کارآیی شبکه‌های آبرسانی

سمانه سیف‌اللهی آغمیونی[۱]*، امید بزرگ حداد[۲] و محمدحسین امید [۳]

[۱]کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، [۲] استادیار و [۳] استاد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۷/۲۸- تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۱۲/۱۱)

چکیده

عدم قطعیت همواره جزئی از فرآیند برنامه‌ریزی است زیرا تعداد زیادی از عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم‌های منابع آب را نمی‌توان در هنگام طراحی و ساخت سیستم به طور قطعی معلوم کرد. با توجه به نقش مؤثر طراحی بهینه یک سیستم توزیع آب در تعدیل هزینه‌های آن، لازمه بهره‌برداری کارآمد از چنین سیستمی، ارزیابی میزان کارآیی آن می‌باشد. در این تحقیق بررسی نحوه عملکرد شبکه لوله‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت همزمان در مقادیر طراحی نیاز گره‌ها و زبری لوله‌ها مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور، میزان انعطاف‌پذیری شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای (Two Loop) نسبت به تغییرات احتمالی همزمان دو متغیر مذکور، توسط روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) و محاسبه یک شاخص کارآیی قطعی ارزیابی گردیده است. همچنین در این حالت محدوده تغییرات مجاز برای پیش‌بینی مقادیر این دو متغیر نیز در این شبکه بررسی شده و نتایج حاکی از آن است که در شرایط تغییرات همزمان متغیرها در افق طراحی، به طور میانگین تقریباً تنها در یک سوم مواقع، این شبکه قادر به تأمین کامل نیاز مصرف‌کنندگان با فشار مورد نیاز بوده و کارآیی مطلوبی خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: عدم قطعیت، کارآیی شبکه، شبیه‌سازی مونت کارلو، نیاز گره، زبری لوله

مقدمه

عدم قطعیت می‌تواند از اندازه‌گیری متغیرها، تخمین پارامترها و هر یک از فرآیندهای موجود در مدلسازی پدیده مورد بررسی و حتی استفاده از مدل مورد نظر ناشی شود. از اینرو تناقضات موجود بین قطعیت مدل‌های ریاضی و عدم قطعیت ذاتی و طبیعی مسائل، می‌تواند به طور جدی اطمینان‌پذیری نتایج حاصل از مدلسازی را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین توسعه مدل‌هایی که عدم قطعیت را نیز شامل شوند، بسیار ارزشمند خواهد بود (Babayan et al., 2005). Bargiela and Hainsworth (1989) برای بررسی عدم قطعیت در پارامترهای طراحی شبکه با استفاده از روش MCS، برداری از ترکیبات مختلف نیاز بر اساس توزیع در نظر گرفته شده تولید کردند و هد گره را برای اعضای این بردار محاسبه کردند. اگر تعداد تمام مجموعه‌های تولید شده برابر با N_Q باشد و با فرض $H_j^{\min}$ و H_j به ترتیب به عنوان فشار کمینه مورد نیاز و فشار موجود در گره jام، شرط $H_j \geq H_j^{\min}$ برای هر گره به تعداد N_S حالت ($N_Q \geq N_S$) برقرار شود، مقدار $P\left(H_j \geq H_j^{\min}\right)$ به صورت N_S/N_Q تخمین زده می‌شود. این یک روش قابل اعتماد است ولی نیاز به محاسبات زیادی دارد.

Bao and Mays (1990) از روش‌های شبیه‌سازی مانند MCS برای بررسی عدم قطعیت در تخمین اطمینان‌پذیری شبکه توزیع آب استفاده کردند. مدل ارائه شده بر این اساس با هدف تعیین اطمینان‌پذیری هیدرولیکی، دارای سه مرحله اصلی است: ۱) تولید مقادیر تصادفی برای متغیرها، ۲) شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه به کمک ابزار شبیه‌ساز KYPIPE و ۳) محاسبه اطمینان‌پذیری شبکه. تحلیل حساسیت در این روش نیز با در نظر گرفتن ۱۰ توزیع مختلف برای متغیرهای تصادفی انجام شده است. در شبکه‌های توزیع آب چون تعیین دقیق تعداد و نوع مصرف‌کنندگان در آینده غیر ممکن است، مقادیر نیاز در گره‌های شبکه به عنوان یکی از منابع عدم قطعیت در فرآیند طراحی و بهره‌برداری شبکه منظور می‌شود (Lansey et al., 1989). با این وجود، برای غلبه بر پیچیدگی‌های مدل‌های هیدرولیکی غیر خطی در تحلیل عملکرد شبکه‌های توزیع آب، می‌توان از مدل‌های هیدرولیکی خطی احتمالاتی استفاده کرد. برای این منظور از دو ساده‌سازی استفاده می‌شود: ۱) تغییرات نیاز دارای توزیع احتمالاتی نرمال است. ۲) هد فشاری مورد نیاز

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: Seifollahi@ut.ac.ir

در هر گره بر اساس یک مدل خطی تخمین زده می‌شود (Yen et al., 1986).

ظرفیت سیستم که متأثر از فساد تدریجی لوله‌ها، جانمایی فیزیکی شبکه در محیط و اتصالات سیستم است، یک عامل غیر قطعی دیگر در طراحی و ارزیابی عملکرد سیستم‌های توزیع آب می‌باشد (Lansey et al., 1989). با توجه به اینکه میزان تأثیر عوامل مختلف که باعث کاهش ظرفیت سیستم می‌شوند نامعلوم است، می‌توان گفت در زبری لوله‌ها نیز به عنوان یک عامل مؤثر بر ظرفیت سیستم عدم قطعیت وجود دارد. Lansey et al. (1989) از روش مقید به شانس با در نظر گرفتن عدم قطعیت در نیاز، هد فشاری مورد نیاز در گره و ضریب زبری لوله‌ها استفاده کردند. در این مدل فقط قطر لوله‌ها به عنوان متغیر تصمیم بوده و تابع هدف به عنوان کمینه کردن هزینه‌های طراحی بر اساس تابعی از ترکیب قطرهای اتصالات ممکن تعریف شده است. مدل بهینه‌سازی به صورت غیر خطی بوده و با روش گرادیان کاهشی تعمیم یافته (GRG) حل شده است. آن‌ها در این مدل از معادل قطعی روابط احتمالاتی هد فشاری استفاده کردند. فرض آن‌ها این بود که هد گره‌ها متغیرهای نرمال تصادفی با میانگین و انحراف معیار معلوم و ثابت هستند در حالیکه در واقعیت در طول جستجو برای جواب بهینه، انحراف معیار و میانگین هد گره‌ها تغییر کرده و از ابتدای فرآیند بهینه‌سازی ثابت نیست (Lansey et al., 1989). در روش بهینه‌سازی طراحی ارائه شده توسط Babayan et al. (2005)، مدل طراحی بهینه تصادفی اولیه به صورت قطعی فرمول‌بندی شده و انحراف معیار به عنوان یک عامل ذاتی برای تغییرات در نظر گرفته شده است. معادل قطعی این روابط به همراه الگوریتم ژنتیک (GA) برای یافتن جواب اقتصادی و کارآمد به کار رفته است. همزمان با آن‌ها Kapelan et al. (2005) نیز طراحی شبکه توزیع آب را به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه با مدلسازی متغیرهای غیر قطعی (مقدار نیاز در گره‌ها به کمک تابع چگالی احتمال نرمال و ضریب زبری لوله‌ها به کمک تابع چگالی احتمال یکنواخت) بررسی کردند. Bozorg Haddad et al. (2008) نیز تغییرات ضریب زبری لوله‌ها را در طراحی سیستم‌های توزیع آب شهری به صورت پویا بررسی کرده‌اند.

هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی کارآیی شبکه طراحی شده در شرایط عدم قطعیت همزمان نیاز گره‌ها و زبری لوله‌ها در افق طراحی با استفاده از روش MCS می‌باشد. برای دستیابی به این امر تغییرات تصادفی این دو متغیر غیر قطعی با در نظر گرفتن توزیع احتمالاتی نرمال برای آن‌ها، بر شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای (Two Loop) که به عنوان شبکه نمونه انتخاب گردیده است، اعمال شده و با استفاده از روش MCS، به ازای مقادیر مختلف ممکن برای متغیرهای مذکور، مقدار شاخص قطعی مورد نظر محاسبه شده است.

ارزیابی کارآیی شبکه‌های آبرسانی در روش MCS

برای طراحی شبکه توزیع آب در ابتدای دوره، مقدار نیاز در نقاط مصرف برای افق طراحی با توجه به نرخ افزایش جمعیت و روند صعودی مصرف برآورد شده و قطر بهینه لوله‌ها برای شبکه‌ای با کمترین هزینه تعیین می‌گردد. چنین شبکه‌ای در سال‌های ابتدای دوران بهره‌برداری قادر است نیاز مصرف‌کنندگان را تأمین کند ولی با گذشت زمان و با توجه به تغییرات روند افزایش جمعیت، تغییر الگوی مصرف و غیره، مقدار نیاز در نقاط مصرف افزایش یافته و شبکه‌ای که برای مقادیر مشخصی از نیازها طراحی شده است، در سال‌های انتهایی دوران بهره‌برداری ممکن است جوابگوی مقادیر متنوع نیاز در گره‌های مصرف نباشد و این امر باعث کاهش کارآیی و انعطاف‌پذیری شبکه در شرایط مختلف خواهد شد. همچنین با گذشت زمان، زبری لوله‌های نصب شده در شبکه در زمان طراحی، در اثر افزایش رسوبگذاری و یا خوردگی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه ظرفیت انتقال هر لوله به زبری آن وابسته است، افزایش زبری و متعاقباً تغییرات ایجاد شده در ضریب زبری هر لوله، ظرفیت هیدرولیکی کل شبکه را تحت تأثیر قرار داده و مشابه تغییرات نیاز، باعث کاهش اطمینان‌پذیری در تأمین نیاز و هد در گره‌های شبکه خواهد شد.

روش MCS یکی از پرکاربردترین روش‌ها در شبکه‌های آبرسانی است. در این روش، بررسی رفتار سیستم بر اساس تأثیر عوامل مختلف با استفاده از شبیه‌سازی سیستم به ازای حالات مختلف از متغیرهای غیر قطعی صورت می‌گیرد. در این روش با توجه به توزیع احتمالاتی مورد نظر برای هر یک از متغیرهای غیر قطعی، سری‌هایی از اعداد تصادفی تولید می‌گردد که احتمال وقوع این اعداد از تابع توزیع مذکور تبعیت می‌کند (Afshar and Takbiri, 2008). همچنین در روش MCS علاوه بر معرفی نوع تابع توزیع احتمال برای متغیر غیر قطعی لازم است پارامترهای توزیع مورد نظر نیز تعیین گردند. به این ترتیب در هر تکرار به ازای سری‌های تصادفی تولید شده برای هر متغیر غیر قطعی، شبکه مورد نظر شبیه‌سازی شده و مقادیر متغیرهای مختلف حاصل از شبیه‌سازی از مدل استخراج می‌گردند.

در این تحقیق شبیه‌سازی شبکه با نرم‌افزار Epanet2.0 انجام شده که این نرم‌افزار برای محاسبه افت انرژی در هر مسیر

جریان از رابطه هیزن-ویلیامز به شکل زیر استفاده می‌کند (Rossman, 2000):

$$h_{f_p} = 4.727\, C_p^{-1.852} L_p D_p^{-4.871} Q_p^{1.852} \qquad p = 1,2,3,\ldots,NP \tag{۱}$$

در این رابطه h_{f_p} = افت هد بر حسب فوت در لوله p ام، C_p = ضریب زبری هیزن-ویلیامز در لوله p ام، L_p = طول لوله p ام بر حسب فوت، D_p = قطر بر حسب فوت در لوله p ام، Q_p = دبی بر حسب فوت مکعب بر ثانیه در لوله p ام و NP = تعداد کل لوله‌های شبکه می‌باشد. در تحلیل شبکه‌های توزیع آب با نرم‌افزارهای شبیه‌ساز هیدرولیکی، فرض اولیه بر تأمین کامل نیاز گره‌ها استوار است و بر این اساس جریان در لوله‌های مختلف و هد گره‌ها برآورد می‌گردد. در این روش که اصطلاحاً تحلیل بر پایه فشار گره (NHA) نامیده می‌شود، فرض بر این است که در صورت وجود هد مورد نیاز در منبع شبکه، سیستم قادر به تأمین کامل نیاز در تمام گره‌ها به صورت همزمان خواهد بود. برای تحلیل شرایطی که هد مورد نیاز در منبع شبکه موجود نیست، لازم است شبکه توزیع، تحت شرایط طبیعی حاکم بر آن مورد بررسی قرار گیرد و ارتفاع فشار واقعی در هر گره و جریان واقعی در هر لوله برآورد گردد. این روش اصطلاحاً تحلیل بر پایه جریان گره (NFA) نامیده می‌شود.

با توجه به نوع شاخص در نظر گرفته شده برای بررسی تأثیر عدم قطعیت‌ها در عملکرد شبکه، بعد از هر تکرار می‌توان یک بار شاخص کارآیی را محاسبه کرد و در نهایت نحوه تغییرات آن را مورد ارزیابی قرار داد. جهت بررسی انعطاف‌پذیری شبکه طراحی شده در تحقیق حاضر از شاخص شکست (Ind_f) با تعریف زیر استفاده شده است (Todini, 2000):

$$Ind_f = \frac{\sum_{j=1}^{NJ} Std.f_j}{\sum_{j=1}^{NJ} Q_j H_{j,\min}} \tag{۲}$$

$$Stdf_j = \begin{cases} Q_j\left(H_{j,\min} - H_j\right) & H_j < H_{j,\min} \\ 0 & H_j \geq H_{j,\min} \end{cases} \tag{۳}$$

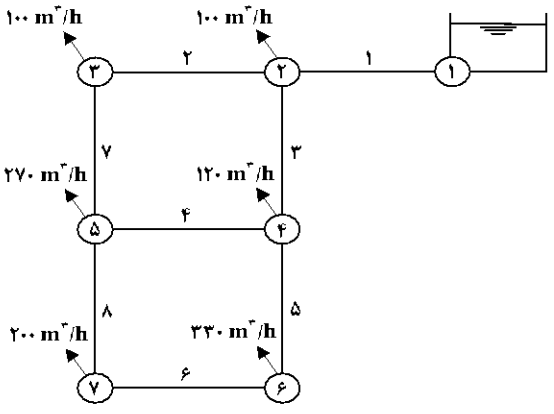
در رابطه (۲)، Ind_f = شاخص شکست به ازای یک سری تصادفی از متغیر غیر قطعی، Q_j = مقدار نیاز غیر قطعی در گره j ام، $H_{j,\min}$ = حداقل هد فشاری مورد نیاز در گره j ام و $Std.f_j$ = میزان انحراف منفی هد فشاری غیر قطعی تأمین شده (H_j) از حداقل هد فشاری مورد نیاز در گره jام می‌باشد که در هر گره شبکه به صورت رابطه (۳) قابل محاسبه است. این انحراف منفی در هر گره به صورت وزنی و با توجه به نیاز غیر قطعی آن گره تعیین می‌گردد. همچنین NJ= تعداد کل گره‌های موجود در شبکه است. در روابط فوق در هر بار محاسبه شاخص شکست، مقدار Q_j برابر با نیاز تصادفی در سری مورد بررسی در نظر گرفته می‌شود. همانطور که روابط نشان می‌دهد مخرج کسر رابطه (۲) را می‌توان به مفهوم حداقل انرژی مورد نیاز در شبکه دانست. بنابراین شاخص شکست، کمبود انرژی تأمین شده در شبکه را نسبت به حداقل انرژی مورد نیاز بیان می‌کند. به این ترتیب هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد انرژی تأمین شده در شبکه به حداقل انرژی مورد نیاز نزدیکتر بوده و میزان کمبود کاهش می‌یابد. بر این اساس شبکه‌ای که با در نظر گرفتن توزیع‌های احتمالاتی برای متغیرهای غیر قطعی آن، کمترین شاخص شکست را به ازای سری‌های تصادفی تولید شده داشته باشد، از انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به تغییرات آن متغیرهای غیر قطعی برخوردار بوده و می‌تواند تغییرات چنین متغیرهایی را جوابگو باشد.

مطالعه موردی (شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای- Two Loop)

Alperovits and Shamir (1977) اولین محققانی بودند که با تدوین یک مدل بهینه‌سازی ساده و با روش برنامه‌ریزی خطی گرادیانی (LPG) به طراحی شبکه آبرسانی دو حلقه‌ای پرداختند. در این شبکه، آب مورد نیاز توسط یک مخزن که در رقوم ثابت ۲۱۰ متر قرار دارد، تأمین می‌شود و عملیات آبرسانی به شش گره مصرف با رقوم‌های ارتفاعی مختلف توسط هشت لوله با قطرهای متفاوت و طول‌های یکسان (۱'۰۰۰ متر) صورت می‌گیرد. در شکل (۱) که حالت شماتیک شبکه آبرسانی دو حلقه‌ای را نشان می‌دهد، مقادیر نیاز برای گره‌های مختلف در افق طراحی مشخص شده است. رقوم ارتفاعی هر گره نیز در جدول (۱) خلاصه شده است.

جدول ۱- رقوم‌های ارتفاعی گره‌های شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای

شماره گره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
رقوم ارتفاعی (متر)	۲۱۰	۱۵۰	۱۶۰	۱۵۵	۱۵۰	۱۶۵	۱۶۰



شکل ۱- شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای

در تحقیق حاضر، طراحی اولیه این شبکه با توجه به تحقیقات Eusuff and Lansey (2003) در نظر گرفته شده است. در این تحقیقات نیازهای طراحی بر اساس آنچه که در شکل (۱) مشخص شده وارد مدل گردیده و ضریب زبری لوله‌ها در طراحی شبکه برابر با ۱۳۰ منظور شده است. آن‌ها با در نظر گرفتن تابع هدف کمینه کردن هزینه‌های طراحی و قطر لوله‌ها به عنوان متغیر تصمیم، از یک مدل ترکیبی به نام SFLANET استفاده کردند که در آن، قسمت بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم فراکاوشی ترکیبی جهش قورباغه (SFLA) و قسمت شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز Epanet2.0 انجام می‌شود. جمعیت اولیه در الگوریتم بهینه‌سازی این مدل، بر اساس ۱۴ قطر لوله تجاری مجاز و به صورت تصادفی تشکیل شده و حداقل هد فشاری مورد نیاز در هر گره جهت تأمین نیاز مصرف‌کنندگان برابر با ۳۰ متر منظور شده است. در نهایت شبکه‌ای با هزینه طراحی ۴۱۹٬۰۰۰ دلار به عنوان شبکه با کمترین هزینه به دست آمده که مشخصات آن در جداول (۲) و (۳) ارائه گردیده است (Eusuff and Lansey, 2003).

جدول ۲- قطر و جریان لوله‌ها در طراحی بهینه شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای

شماره لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
قطر (میلیمتر)	۴۵۷/۲	۲۵۴/۰	۴۰۶/۴	۱۰۱/۶	۴۰۶/۴	۲۵۴/۰	۲۵۴/۰	۲۵/۴
جریان (متر مکعب بر ساعت)	۱۱۲۰/۰	۳۳۶/۹	۶۸۳/۱	۳۲/۶	۵۳۰/۶	۲۰۰/۶	۲۳۶/۹	۰/۶

جدول ۳- هد فشاری گره‌ها در طراحی بهینه شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای

شماره گره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
هد فشاری تأمین شده (متر)	-	۵۳/۲۴	۳۰/۴۴	۴۳/۴۴	۳۳/۷۸	۳۰/۴۳	۳۰/۵۳

به این ترتیب با در نظر گرفتن طراحی اولیه برای این شبکه با فرض قطعی بودن نیاز و زبری، می‌توان تأثیر تغییرات احتمالی در متغیرهای مذکور را در افق طراحی بر انعطاف‌پذیری شبکه بررسی کرد. بر این اساس در روش MCS با فرض توزیع نرمال برای هر متغیر غیر قطعی تعدادی سری تصادفی تولید می‌شود و شبکه به ازای هر سری تصادفی با نرم‌افزار Epanet2.0 شبیه‌سازی می‌گردد. در پایان هر شبیه‌سازی اطلاعات مربوط به متغیرهای مورد نظر در شبکه استخراج شده و شاخص کارآیی قطعی محاسبه می‌گردد.

نتایج و بحث

در این تحقیق ابتدا اطلاعات شبکه طراحی شده شامل قطر لوله‌های بهینه، نیازهای طراحی و ضریب زبری مورد نظر برای طراحی شبکه به مدل توسعه یافته معرفی گردیده و با توجه به توزیع نرمال که برای متغیرهای غیر قطعی نیاز گره‌ها و ضریب زبری لوله‌ها انتخاب شده است، در روش MCS به تعداد ۳٬۰۰۰ سری تصادفی در افق طراحی برای هر یک از متغیرهای غیر قطعی تولید شده است. برای تولید هر سری تصادفی لازم است پارامترهای توزیع احتمالاتی به مدل معرفی گردد. توزیع نرمال دارای دو پارامتر میانگین و انحراف معیار توزیع بوده و ۹۹/۷۳٪ از اعداد نرمال در محدوده [((انحراف معیار)×۳+میانگین) و ((انحراف معیار)×۳-میانگین)] قرار دارند. میانگین توزیع در تولید سری‌های تصادفی نیاز گره‌ها برابر با نیاز طراحی و در تولید سری‌های تصادفی ضریب زبری لوله‌ها برابر با ۱۳۰ (ضریب زبری طراحی) برای هر لوله در نظر گرفته شده است. انحراف معیار در توزیع احتمالاتی هر متغیر تصادفی بیان‌کننده میزان عدم قطعیت آن متغیر است. به این ترتیب که هر چه انحراف معیار بیشتر باشد، دامنه تغییرات متغیر مورد نظر وسیعتر بوده و این متغیر می‌تواند مقادیر متنوعی را اختیار کند. در نتیجه عدم قطعیت آن بیشتر است. در این تحقیق از تعریف ضریب تغییرات (CV) به صورت حاصل تقسیم انحراف معیار متغیر غیر قطعی بر میانگین آن به عنوان معیار عدم قطعیت استفاده شده است. بر این اساس ضریب تغییرات در تولید سری‌های تصادفی نیاز گره‌ها و ضریب زبری لوله‌ها برابر با صفر، ۰/۱ و ۰/۲ در نظر گرفته شده است (Lansey et al., 1989). ضریب تغییرات صفر به مفهوم عدم وجود عدم قطعیت در متغیر مورد نظر است و بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده در شبکه دو حلقه‌ای، با فرض توزیع نرمال برای متغیرهای غیر قطعی مورد نظر، مقدار ۰/۲ برای ضریب تغییرات نیاز گره‌ها و ضریب زبری لوله‌ها بیشترین مقدار بوده و به ازای مقادیر بزرگتر از ۰/۲، به دلیل گسترده‌تر شدن محدوده تغییرات مقادیر ممکنی که هر متغیر می‌تواند اختیار کند، دنباله سمت چپ منحنی زنگوله‌ای توزیع نرمال، شامل اعداد منفی نرمال برای متغیر غیر قطعی مورد نظر می‌شود. با توجه به اینکه مقدار نیاز هر گره یا ضریب زبری هر لوله با استفاده از احتمال تصادفی نرمال از این محدوده انتخاب می‌شود، لذا امکان شبیه‌سازی و انتخاب مقادیر منفی برای هر یک از متغیرهای غیر قطعی در روش MCS وجود دارد و این حالت در واقعیت مفهوم فیزیکی ندارد. همچنین با فرض مقدار ۰/۲ برای CV تقریباً ۶۰٪ داده‌ها در اطراف میانگین در محدوده اعداد نرمال قرار گرفته و به عنوان محدوده مجاز برای پیش‌بینی‌های این دو متغیر غیر قطعی منظور می‌گردند، که برای دستیابی به نتایج مطلوب و ارزیابی قابلیت مدل توسعه یافته در این تحقیق کفایت می‌کند. مقادیر نیاز منفی برای یک گره در هنگام تولید سری‌های تصادفی در روش MCS، نیز

شرایطی مشابه با عدم وجود هد مورد نیاز در شبکه، ایجاد می‌کند و در این حالت لزوم استفاده از روش‌های NFA مطرح می‌شود.

بعد از تولید سری‌های تصادفی، به ازای هر زوج از سری‌های نیاز و ضریب زبری، شبکه با استفاده از نرم‌افزار Epanet2.0 شبیه‌سازی شده و مقدار شاخص شکست با استفاده از روابط (۲) و (۳) تعیین شده است. در نهایت خروجی مدل به ازای ترکیبات مختلف ضریب تغییرات شامل ۳٬۰۰۰ شاخص شکست خواهد بود که مشخصات آماری آن‌ها در سال طراحی در جدول (۴) خلاصه گردیده است.

جدول ۴- مشخصات آماری شاخص شکست (Ind_f) در ۳٬۰۰۰ سری تصادفی به ازای ترکیبات مختلف مقادیر CV

CV نیاز گره‌ها	صفر	صفر	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲
CV ضریب زبری لوله‌ها	۰/۱	۰/۲	صفر	۰/۱	۰/۲	صفر	۰/۱	۰/۲
حداکثر	۰/۱۰۶	۰/۵۸۲	۰/۱۴۵	۰/۱۸۳	۰/۷۷۳	۰/۳۳۸	۰/۳۷۶	۰/۸۸۳
متوسط	۰/۰۰۳	۰/۰۱۷	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۰۲۸	۰/۰۴۰	۰/۰۴۴	۰/۰۵۳
حداقل	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر
انحراف معیار	۰/۰۰۸	۰/۰۴۳	۰/۰۲۰	۰/۰۲۵	۰/۰۵۳	۰/۰۵۶	۰/۰۶۲	۰/۰۸۰
ضریب تغییرات	۲/۵۴۸	۲/۵۷۱	۱/۵۶۹	۱/۵۰۹	۱/۸۵۹	۱/۳۹۵	۱/۴۰۱	۱/۵۰۳

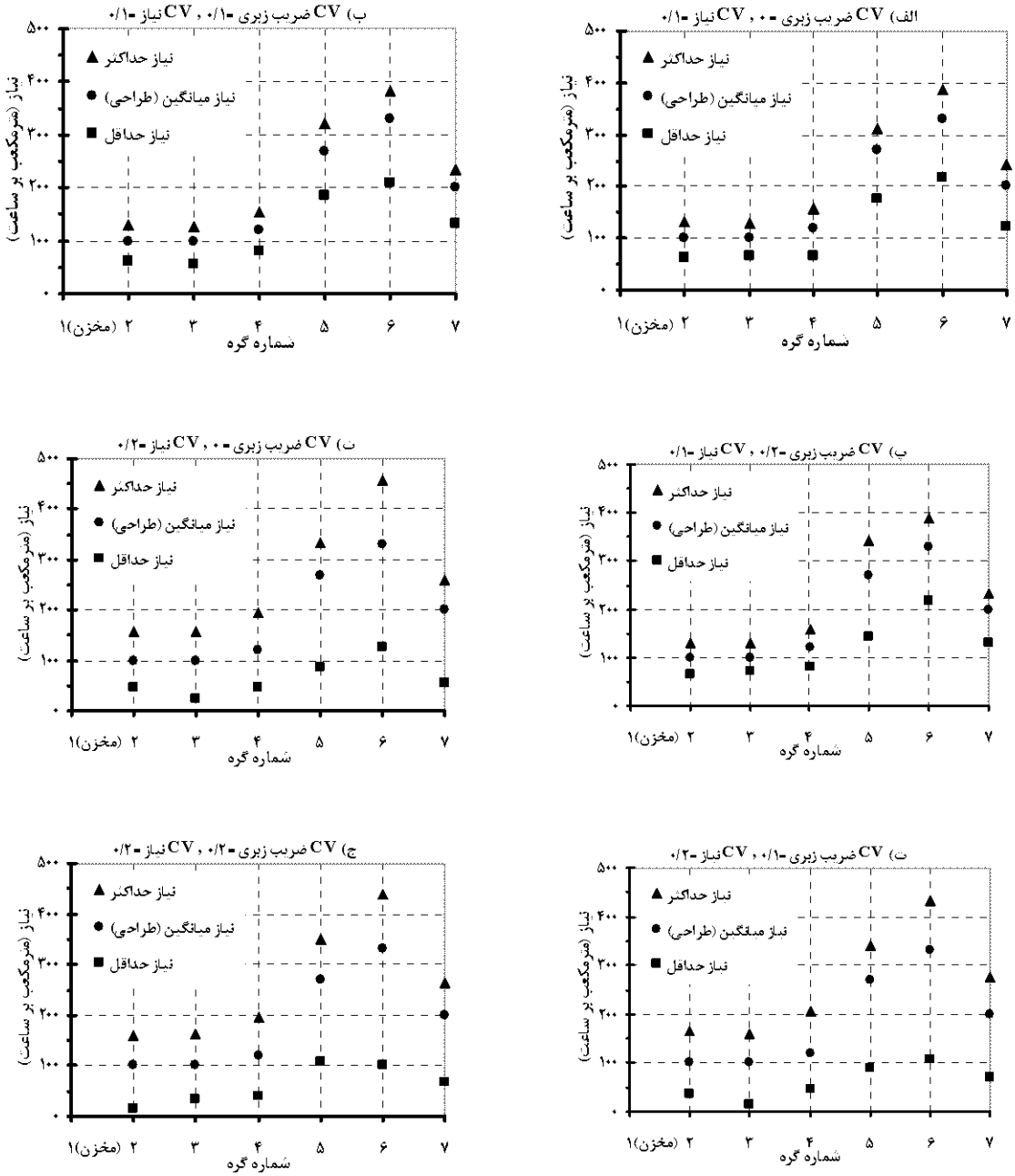
همانطور که اعداد جدول نشان می‌دهند، به جز زمانی که فقط عدم قطعیت ضریب زبری لوله‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد، ضریب تغییرات شاخص شکست به ازای ترکیبات مختلف مقادیر CV برای متغیرهای غیر قطعی تقریباً به عدد ۱/۵ همگرا می‌گردد. علاوه بر آن در شرایطی که ضریب زبری لوله‌ها به صورت قطعی و نیاز گره‌ها به صورت غیر قطعی در نظر گرفته می‌شود، ضریب تغییرات شاخص شکست در این شبکه نسبت به شرایطی که نیاز گره‌ها به صورت قطعی و ضریب زبری لوله‌ها به صورت غیر قطعی در نظر گرفته می‌شود، کمتر است. به عبارت دیگر عدم قطعیت در ضریب زبری لوله‌ها در این شبکه زمانی که سایر پارامترها به صورت قطعی در نظر گرفته می‌شوند، تأثیر بیشتری در شاخص شکست دارد. این حالت می‌تواند به دلیل تغییرات ناهمسو در نیاز گره‌ها و ضریب زبری لوله‌ها در اثر گذشت زمان باشد.

برای تعیین میزان کارآیی شبکه نسبت به تغییرات همزمان متغیرهای غیر قطعی، شاخص‌های شکست حاصل از اجرای مدل بررسی شده و تعداد سری‌های تصادفی که دارای کمترین مقدار شاخص شکست (مقدار صفر) بوده‌اند مطابق جدول (۵) به دست آمده‌اند. در این تحقیق تأمین هد فشاری مورد نیاز در هر گره با توجه به تعریف شاخص شکست، به عنوان کارآیی شبکه مورد بررسی قرار گرفته است.

اعداد این جدول نشان می‌دهد، در شرایطی که عدم قطعیت همزمان نیاز گره‌ها و ضریب زبری لوله‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد، شبکه مورد نظر نسبت به تغییرات احتمالی ضریب زبری حساسیت قابل توجهی نداشته و به ازای یک مقدار ثابت برای CV نیاز گره‌ها، با افزایش عدم قطعیت در ضریب زبری لوله‌ها، کارآیی شبکه کاهش چشمگیری نمی‌یابد. اگر چه با تغییر مقدار ثابت CV نیاز گره‌ها از ۰/۱ به ۰/۲، کاهش کارآیی شبکه با افزایش عدم قطعیت در ضریب زبری بیشتر شده و این حالت می‌تواند بیان‌کننده تأثیر بیشتر عدم قطعیت نیاز گره‌ها در بررسی کارآیی شبکه نسبت به عدم قطعیت ضریب زبری لوله‌ها باشد. علاوه بر آن به ازای یک مقدار ثابت برای CV ضریب زبری لوله‌ها، افزایش عدم قطعیت نیاز گره‌ها تأثیر زیادی در کارآیی شبکه داشته و باعث کاهش آن می‌شود. اما در شرایطی که نیاز گره‌ها به عنوان یک متغیر قطعی و ضریب زبری لوله‌ها به عنوان یک متغیر غیر قطعی در نظر گرفته می‌شود، کارآیی شبکه تنها تحت تأثیر عدم قطعیت ضریب زبری بوده و با افزایش این عدم قطعیت، کاهش چشمگیری در کارآیی شبکه صورت می‌گیرد. همچنین با غیر قطعی فرض کردن نیاز گره‌ها و قطعی فرض کردن ضریب زبری لوله‌ها، کارآیی شبکه تنها تحت تأثیر عدم قطعیت نیاز گره‌ها بوده و همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش CV متغیر غیر قطعی، کارآیی شبکه کاهش می‌یابد. جهت تعیین محدوده تغییرات نیاز گره‌ها و ضریب زبری لوله‌ها در سری‌های تصادفی با شاخص شکست صفر، مقادیر حداکثر و حداقل برای هر یک از این متغیرها، در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه گردیده است.

جدول ۵- کارآیی شبکه نسبت به تغییرات احتمالی توأم متغیرهای غیر قطعی به ازای ترکیبات مختلف مقادیر CV

CV نیاز گره‌ها	صفر	صفر	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۲
CV ضریب زبری لوله‌ها	۰/۱	۰/۲	صفر	۰/۱	۰/۲	صفر	۰/۱	۰/۲
تعداد سری‌های با شاخص شکست صفر از بین ۳٬۰۰۰ سری تصادفی	۱۷۵۰	۱۶۳۲	۱۱۲۹	۱۰۲۵	۱۰۲۲	۹۹۱	۹۶۳	۹۰۹
میزان کارآیی شبکه (درصد)	۵۸/۳۳	۵۴/۴۰	۳۷/۶۳	۳۴/۱۷	۳۴/۰۷	۳۳/۰۳	۳۲/۱۰	۳۰/۳۰

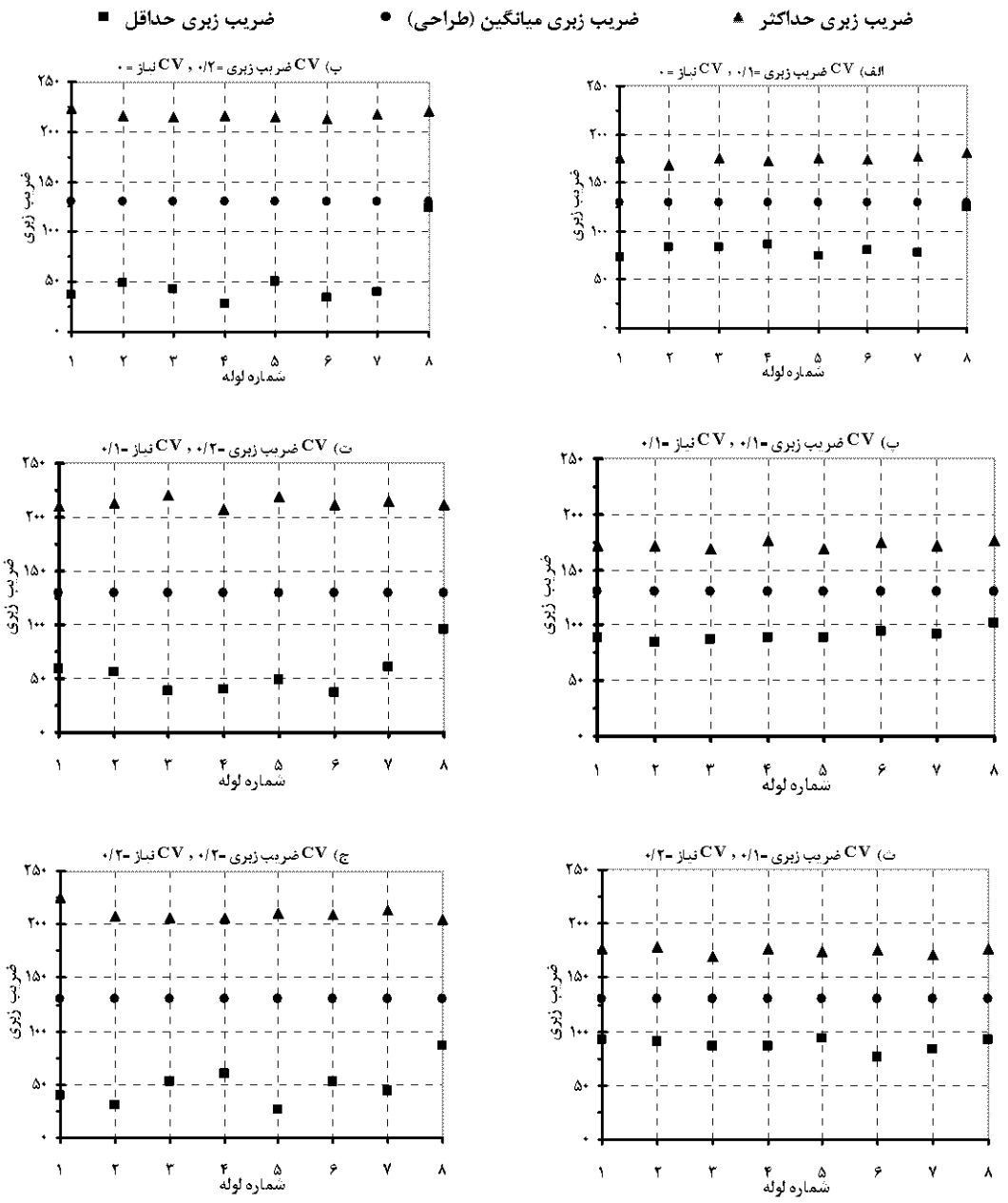


شکل ۲- محدوده تغییرات نیاز گره‌ها در سری‌های با شاخص شکست صفر: الف) CV ضریب زبری=۰ ، CV نیاز=۰/۱، ب) CV ضریب زبری=۰/۱ ، CV نیاز=۰/۱، پ) CV ضریب زبری=۰/۲ ، CV نیاز=۰/۱، ت) CV ضریب زبری=۰ ، CV نیاز=۰/۲، ث) CV ضریب زبری=۰/۱ ، CV نیاز=۰/۲، ج) CV ضریب زبری=۰/۲ ، CV نیاز=۰/۲

همانطور که شکل (۲) نشان می‌دهد برای هر گره یک مقدار حداقل و یک مقدار حداکثر به دست آمده است که تقریباً در تمام گره‌ها و در تمام حالات حد پایین فاصله بیشتری از مقدار میانگین دارد. تأمین مقادیر کمتر از نیاز میانگین (نیاز طراحی) باعث ایجاد هد فشاری کمتر در گره‌ها شده و به دلیل عدم تأمین هد فشاری کافی در نقاط مصرف، از کارآیی شبکه کاسته می‌گردد. باید توجه داشت که با افزایش عدم قطعیت نیاز گره‌ها، فاصله حد پایین از مقدار میانگین بیشتر شده و محدوده گسترده‌تری از مقادیر کمتر از میانگین مورد بررسی قرار می‌گیرند.

همانطور که شکل (۳) نشان می‌دهد برای ضریب زبری در هر لوله یک محدوده با دو مرز حداقل و حداکثر تعیین شده است. به ازای مقدار ثابت برای CV نیاز گره‌ها، با افزایش عدم قطعیت ضریب زبری لوله‌ها، محدوده تغییرات برای هر لوله بزرگتر شده و ضریب زبری هر لوله مقادیر متفاوت بیشتری را می‌تواند اختیار کند. احتمال وقوع این مقادیر در این تحقیق از تابع توزیع احتمال نرمال تبعیت می‌کند. به ازای حالات مختلف فاصله حد پایین و حد بالا از مقدار میانگین (ضریب زبری طراحی) در لوله‌های ۱ تا ۷ تقریباً یکسان است ولی در لوله هشتم به دلیل شرایط هیدرولیکی حاکم، مرز

پایین به مقدار میانگین نزدیکتر است. این تفاوت بین محدوده تغییرات لوله هشتم و سایر لوله‌ها در عدم قطعیت‌های بالاتر نمایان‌تر می‌باشد. این لوله در شبکه دو حلقه‌ای مورد مطالعه در مقایسه با سایر لوله‌ها دارای دبی بسیار کمی است و با توجه به ثابت بودن طول و قطر لوله در این مدل بر طبق رابطه (۱) تغییرات ضریب زبری در این لوله تأثیر بیشتری در میزان افت هد خواهد داشت. در نتیجه جهت افزایش کارآیی شبکه و دستیابی به انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به تغییرات ضریب زبری لوله‌ها، این متغیر غیر قطعی از تغییرپذیری کمتری برخوردار بوده و بنابراین محدوده مجاز مربوط به تغییرات آن در این لوله کوچکتر می‌باشد. با توجه به رابطه (۱) افت هد در هر لوله با ضریب زبری آن رابطه معکوس دارد. بر این اساس اگر مقدار ضریب زبری در لوله هشتم نسبت به مقدار میانگین کاهش یابد، افت هد در این لوله نسبت به افت هد مورد انتظار، افزایش یافته و هد تأمین شده در گره‌های مرتبط با این لوله نسبت به هد مورد نیاز کاهش می‌یابد. در نتیجه با گسترده‌تر شدن محدوده پایین تغییرات ضریب زبری نسبت به میانگین در این لوله، نارسایی شبکه افزایش یافته و این امر باعث کاهش انعطاف‌پذیری نسبت به تغییرات ضریب زبری لوله‌ها می‌گردد.



شکل ۳- محدوده تغییرات ضریب زبری لوله‌ها در سری‌های با شاخص شکست صفر: الف) CV ضریب زبری=۰/۱ , CV نیاز=۰، ب) CV ضریب زبری=۰/۲ , CV نیاز=۰، پ) CV ضریب زبری=۰/۱ , CV نیاز=۰/۱، ت) CV ضریب زبری=۰/۲ , CV نیاز=۰/۱، ث) CV ضریب زبری=۰/۱ , CV نیاز=۰/۲، ج) CV ضریب زبری=۰/۲ , CV نیاز=۰/۲

در شکل (۲) برای حالتی که ضریب تغییرات نیاز برابر با صفر است، چون مقدار نیاز در گره‌های مختلف تغییر نکرده و به عنوان یک متغیر قطعی فرض شده است، محدوده تغییرات نشان داده نشده است. این شرایط برای ضریب زبری لوله‌ها نیز حاکم است. یعنی در شکل (۳) برای شرایطی که ضریب زبری به عنوان یک متغیر قطعی است (CV ضریب زبری=۰)، محدوده تغییراتی ارائه نشده است. بر طبق این شکل‌ها در صورتی که در هر حالت، مقدار این متغیرها در سال طراحی، بین مقادیر حداقل و حداکثر ارائه شده برای هر یک تغییر کند، شبکه توانایی تأمین نیاز مصرف‌کنندگان را با فشار کافی دارا بوده و می‌توان گفت عدم قطعیت‌های موجود در متغیرهای بهره‌برداری از شبکه پاسخ داده می‌شوند، چرا که شاخص شکست صفر بوده و طبق تعریف ارائه شده برای این شاخص، در این حالت حداقل انرژی مورد نیاز در شبکه تأمین می‌گردد. به عبارت دیگر شبکه طراحی شده فقط در محدوده‌های ارائه شده برای این دو متغیر غیر قطعی، دارای انعطاف‌پذیری کامل نسبت به تغییرات آن‌ها بوده و کارآیی مطلوبی دارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق ارزیابی نحوه عملکرد شبکه توزیع آب با لحاظ کردن عدم قطعیت همزمان نیاز گره‌ها و زبری لوله‌ها مورد توجه بوده است. برای این منظور مدلی بر اساس روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) توسعه یافته و از طریق محاسبه یک شاخص کارآیی قطعی نحوه عملکرد شبکه بررسی شده است. مدل مورد نظر برای شبکه توزیع آب دو حلقه‌ای اجرا شده و تغییرات احتمالی همزمان نیاز گره‌ها و زبری لوله‌ها به عنوان دو متغیر غیر قطعی مؤثر در عملکرد شبکه، بر آن اعمال گردیده است. برای وارد کردن عدم قطعیت به صورت عددی در محاسبات، از مفهوم ضریب تغییرات (CV) استفاده شده و ترکیبات مختلف از مقادیر متفاوت ضریب تغییرات برای این دو متغیر در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد، در شرایطی که فقط عدم قطعیت زبری لوله‌ها بر شبکه اعمال می‌شود، شبکه مورد مطالعه به طور میانگین تقریباً در ۵۶٪ از مواقع، در شرایطی که فقط عدم قطعیت نیاز گره‌ها در مدل لحاظ می‌شود، تقریباً در ۳۵٪ از مواقع و در شرایطی که عدم قطعیت همزمان این دو متغیر بررسی می‌گردد، تقریباً در ۳۳٪ از مواقع توانایی تأمین دبی و فشار کافی در گره‌ها را دارد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت این شبکه نسبت به عدم قطعیت تنها زبری لوله‌ها درصد کارآیی بیشتری داشته و در مقایسه با بررسی عدم قطعیت تنها نیاز گره‌ها از حساسیت کمتری برخوردار می‌باشد. در نهایت نیز با تعیین محدوده تغییرات برای نیاز گره‌ها و ضریب زبری لوله‌ها به ازای ترکیبات مختلف از CV دو متغیر غیر قطعی و با فرض توزیع احتمالاتی نرمال برای هر دو متغیر، مشخص شده است که علاوه بر مقدار میانگین که در طراحی شبکه به کار می‌رود، برای هر متغیر دو مقدار حداقل و حداکثر نیز می‌توان در نظر گرفت، به گونه‌ای که مقادیر بین این دو مرز تأثیری بر کارآیی شبکه نداشته و عملکرد مناسبی را می‌توان انتظار داشت. در این تحقیق از رابطه هیزن-ویلیامز به عنوان معادله مقاومت لوله‌ها جهت شبیه‌سازی شبکه به ازای سری‌های تصادفی نرمال متغیرهای غیر قطعی استفاده شده و در طول تحلیل، قطر لوله‌ها ثابت و برابر با قطرهای طراحی می‌باشد. شبیه‌سازی و طراحی قطعی اولیه شبکه مورد مطالعه نیز با استفاده از همین رابطه صورت گرفته که این امر نیز لزوم اعمال عدم قطعیت در ضریب زبری هیزن-ویلیامز و استفاده از رابطه مقاومت مذکور را ایجاد می‌کند. ارزیابی عدم قطعیت زبری لوله‌ها با استفاده از معادلات مقاومت دیگر همچون رابطه دارسی-ویسباخ، به دلیل مشکل بودن تخمین مقدار ضرایب آن‌ها و همچنین عدم دسترسی به نرم‌افزارهای شبیه‌سازی هیدرولیکی بر پایه سایر معادلات مقاومت، می‌تواند فرآیند تحلیل کارآیی شبکه را با پیچیدگی‌هایی روبرو نماید. ای‌ن در حالی است که تغییر در مقدار نیاز می‌تواند در مقدار دبی عبوری از لوله‌ها تأثیر داشته و در نتیجه ضریب مقاومت لوله تغییر کند که در استفاده از روابط مقاومت دیگر لازم است به این مورد توجه شود. باید توجه داشت که طراحی شبکه‌های توزیع آب به دلیل تغییرات میزان مصرف در طول دوره بهره‌برداری، و همچنین به دلیل سالخوردگی و رسوبگذاری در لوله‌ها در اثر گذشت زمان، با مشکلات فراوانی روبرو بوده و طراحی مطمئن شبکه‌ها به گونه‌ای که بتواند در تمام دوران بهره‌برداری جوابگوی نیاز مصرف‌کنندگان باشد، نیازمند پیش‌بینی‌های دقیق میزان مصرف، نحوه تغییرات زبری و رفتار هر پارامتر غیر قطعی مؤثر دیگر با گذشت زمان می‌باشد. علاوه بر آن توسعه روش‌هایی که بتوانند عدم قطعیت متغیرهای غیر قطعی موجود در طراحی شبکه‌های توزیع آب را مدلسازی کنند نیز گامی مهم در جهت افزایش کارآیی و اطمینان‌پذیری شبکه‌ها محسوب می‌گردد.

REFERENCES

Afshar, A. and Takbiri, Z. (2008). Risk analysis of dam according to uncertainties of flood models, Case study: Karkheh dam. In: Proceeding of *3rd Congress on Water Resources Management of Iran,* 14-16 Oct., Development Engineering Faculty, Tabriz University, Tabriz, Iran, pp.

33.(In Farsi)

Alperovits, A. and Shamir, U. (1977). Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, 13(6), 885-900.

Babayan, A.V., Kapelan, Z., Savic, D.A. and Walters, G.A. (2005). Least-cost design of water distribution networks under uncertainty. *Journal of Water Resources Planning and Management,* (ASCE), 131(5), 375-382.

Bao, Y. and Mays, L.W. (1990). Model for water distribution system reliability. *Journal of Hydraulic Engineering,* (ASCE), 116(9), 1119-1137.

Bargiela, A. and Hainsworth, G. (1989). Pressure and flow uncertainty in water system. *Journal of Water Resources Planning and Management,* (ASCE), 115(2), 212-229.

Bozorg Haddad, O., Adams, B.J. and Mariño, M.A. (2008). Optimum rehabilitation strategy of water distribution systems using the HBMO algorithm. *Journal of Water Supply Research and Technology,* (AQUA), 57(5), 337-350.

Eusuff, M.M. and Lansey, K.E. (2003). Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management,* (ASCE), 129(3), 210-225.

Kapelan, Z., Savic, D.A. and Walters, G.A. (2005). Multiobjective design of water distribution systems under uncertainty. *Water Resources Research,* 41(11), 11407-11415.

Lansey, K.E., Duan, N., Mays, L.W. and Tung, Y.K. (1989). Water distribution system design under uncertainties. *Journal of Water Resources Planning and Management,* (ASCE), 115(5), 630-645.

Rossman, L.A. (2000). *Epanet2 users manual*. USEPA, Washington, D.C.

Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic Approach. *Urban Water,* 2(3), 115-122.

Yen, B.C., Cheng, S.T. and Melching, C.S. (1986). B.C. Yen (Ed.), Stochastic and risk analysis in hydraulic engineering, *First-order reliability analysis*. Water Resources Publications, Littleton, Col., 1-36.