

پهنه‌بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب با اعمال عدم قطعیت پارامترهای کلیدی

مهدی دینی^{۱*}، امین محمدی‌کلیبر^۲، وحید نورانی^۳، سعید هاشمی^۴

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

^۲ دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

^۳ استاد گروه آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۴ دکتری مدل‌سازی هیدرولیکی، شرکت جاکوبز، کانادا

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۳، بازنگری: ۱۴۰۰/۲/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۱۳، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۴/۱۳

چکیده

مدل‌های شبکه توزیع آب دارای انواع عدم قطعیت‌ها در داده‌ها، پارامترها، ساختار مدل می‌باشند که معمولاً در هنگام مدل‌سازی به صورت قطعی در نظر گرفته می‌شوند و این مسئله می‌تواند دقت مدل‌ها در تصمیم‌گیری‌ها را با مشکل مواجه کند. در این مقاله، با پهنه‌بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب با اعمال عدم قطعیت هم‌زمان پارامترها سعی شده است که این مشکل تا حدودی حل شود. برای این منظور ابتدا مقادیر قطعی پارامترها در سال‌های مختلف در طول دوره طرح برآورد شده و سپس با استفاده از توزیع نرمال برای ضرایب هم‌زن ویلیامز (Hazen-Williams) لوله‌ها و مصارف گره‌ها و توزیع ریسک برای قطر لوله‌ها، مقادیر غیرقطعی آن‌ها محاسبه گردیده است. با اعمال مقادیر غیرقطعی به مدل شبیه‌ساز شبکه سطوح کارایی شبکه به صورت احتمالاتی تعیین شده است. مدل‌سازی در محیط MATLAB و با لینک با شبیه‌ساز شبکه (EPANET) انجام شده است. مدل‌سازی عدم قطعیت پارامترها با روش مونت‌کارلو در دو حالت ضریب تغییرات ۱۰ و ۲۰ درصد و کارایی هیدرولیکی شبکه با ارزیابی شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه (NPRI) (Network Pressure Reliability Index) انجام شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع آب کلیر پیاده‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو حالت، بالاترین سطوح عملکرد شبکه با احتمال وقوع زیاد در سال‌های اولیه دوره طرح در ساعت‌های حداکثر مصرف و در سال‌های انتهای دوره طرح در ساعت‌های متوسط مصرف اتفاق می‌افتد. همچنین بررسی روند تغییرات سالانه سطوح عملکرد شبکه نشان می‌دهد که در حالت ضریب تغییرات ۱۰ درصد، بهترین سرویس‌دهی شبکه در سال ۲۳ با احتمال ۵۵ درصد عملکرد قابل قبول و در حالت ضریب تغییرات ۲۰ درصد، بهترین سرویس‌دهی شبکه در سال ۲۰ با احتمال ۴۶ درصد عملکرد قابل قبول اتفاق می‌افتد. در مجموع پهنه‌بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه بازخورد دقیقی از سرویس‌دهی شبکه به دست می‌آورد که می‌تواند در تصمیم‌گیری در جهت اعمال برنامه‌ریزی مدیریت بهره‌برداری یا بازسازی و نوسازی شبکه مؤثر باشد.

کلیدواژه‌ها: پهنه‌بندی، کارایی هیدرولیکی، شبکه توزیع آب کلیر، عدم قطعیت، مونت‌کارلو، NPRI، EPANET، MATLAB.

۱- مقدمه

در دسترس باشد. با توجه به کمی و کیفی بودن اطلاعات و خطاهای موجود در این داده‌ها، سیستم‌های منابع آب دارای انواع عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، سازه‌ای، کیفی و اقتصادی می‌باشد. این عدم قطعیت‌ها در سیستم‌های مهندسی آب به صورت طبیعی، سیستماتیک، تصادفی و عدم قطعیت در پارامترها، داده‌ها و عملکرد سازه ظاهر می‌گردد. هر یک از این عدم قطعیت‌ها می‌تواند تأثیر متفاوتی در کارایی شبکه آب داشته باشد به عنوان مثال عدم قطعیت موجود در ضرایب زبری، قطر

گسترش شهرها و به طبع آن زیرساخت‌های شهری مستلزم مدیریت صحیح و دقیق منابع آبی است. در این راستا تأمین آب شرب کافی با فشار و کیفیت مناسب برای مصرف‌کنندگان در برنامه‌ریزی شهری مورد توجه مدیران می‌باشد. راه‌کارهای متفاوتی جهت مدیریت این ساختارها ارائه شده است که برای هرگونه تصمیم‌گیری در این زمینه باید اطلاعات کافی، مناسب و قابل اطمینانی از عملکرد هیدرولیکی و کیفی شبکه‌های توزیع آب

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۱۴۵۲۵۸۰

آدرس ایمیل: m.dini@azaruniv.ac.ir (م. دینی)، amin.mohammadikaleibar@gmail.com (ا. محمدی)، nourani@tabrizu.ac.ir (و. نورانی)،

saeed.hashemi@jacobs.com (س. هاشمی).

متغیر مذکور، توسط روش مونت کارلو و محاسبه یک شاخص کارایی قطعی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که در افق طراحی مورد مطالعه تنها در یک سوم موارد، شبکه قادر به تأمین کامل نیاز مصرف کنندگان با فشار مورد نیاز و کارایی مطلوب است.

Aghmiuni و همکاران (۲۰۱۱) کارایی بلندمدت شبکه‌های توزیع آب بر اساس عدم قطعیت مصارف گرهی را بررسی کردند. آن‌ها از روش مونت کارلو برای شبیه‌سازی عدم قطعیت تقاضا و از الگوریتم جهش قورباغه برای طراحی ابعاد شبکه استفاده کردند. نتایج نشان داد که عدم اعمال عدم قطعیت مصارف گرهی در طراحی اولیه شبکه، کارایی شبکه در طول دوره طرح را کاهش می‌دهد.

Seifollahi-Aghmiuni و همکاران (۲۰۱۳a) تأثیر عدم قطعیت زبری لوله‌ها بر کارایی شبکه‌های توزیع آب را با روش مونت کارلو بررسی کردند و نشان دادند که شبکه تنها در ۱۰ سال اول دوره بهره‌برداری دارای عملکرد مناسب است.

Seifollahi-Aghmiuni و همکاران (۲۰۱۳b) در تحقیق دیگری آنالیز ریسک شبکه‌های توزیع آب با اعمال هم‌زمان عدم قطعیت مصرف گرهی و زبری لوله را انجام دادند و نشان دادند که در طول دوره بهره‌برداری به‌طور متوسط کمبود تأمین تقاضا و فشار در شبکه در حدود ۴۱ و ۶۱ درصد است.

Sivakumar و همکاران (۲۰۱۵) آنالیز عدم قطعیت شبکه توزیع آب با استفاده از لینک ایپانت^۵ و الگوریتم ژنتیک را انجام دادند. برای مدل‌سازی عدم قطعیت زبری لوله‌ها از روش برش فازی و برای تعیین پارامترهای ناشناخته در هر سطح برش فازی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. مقادیر دبی جریان در لوله‌ها و هد در گره‌ها به‌عنوان خروجی غیرقطعی و فازی بررسی شد. نتایج نشان داد که برای شبکه دوحلقه‌ای دبی جریان لوله‌ها در حدود ۴۸/۳ درصد و هد گره‌ها در حدود ۴/۳ متر متغیر است.

Lee و همکاران (۲۰۱۶) تحلیل تحلیل عدم قطعیت موجود در تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار در شبکه‌های توزیع آب را انجام دادند که در آن الگوریتم گرادیان به‌کار رفته در تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا اصلاح شده است تا یک روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار به‌دست آید. همچنین روش مونت کارلو برای تحلیل عدم قطعیت موجود در تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار به‌کار رفته است. این مدل قابلیت کاربرد در شرایط کمبود فشار، تغییرات تقاضا به‌دلیل مصارف آتش‌نشانی و شرایط شکست شبکه و قطع پمپ را دارد. تابش و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از مفهوم منطق فازی و به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک، تأثیر عدم قطعیت‌ها موجود در متغیرهای ورودی بر نتایج تحلیل هیدرولیکی شبکه توزیع آب را

لوله‌ها و مصارف در گره‌ها که جزء پارامترهای هیدرولیکی می‌باشند، بر تغییرات فشار آب خروجی از گره‌ها تأثیرگذار هستند. در صورتی که در طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های توزیع آب این پارامترها به‌صورت قطعی در نظر گرفته شود، این احتمال وجود دارد که در سال‌های آتی و در شرایط بحرانی این پارامترها به شکل دیگری تغییر کنند و موجب اختلالات هیدرولیکی در شبکه شوند. پژوهش‌های زیادی در سطح ملی و بین‌المللی در این زمینه صورت گرفته است که در ادامه به‌مرور برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود.

Branisavljevic و همکاران (۲۰۰۸) کاهش عدم قطعیت مصارف گرهی در مدل‌های شبکه توزیع آب را با استفاده از داده‌های جریان ورودی بررسی کردند. در این مطالعه با اندازه‌گیری دبی جریان ورودی در حالت‌های مختلف و با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک عدم قطعیت مصارف گرهی کمینه‌شده است. برای مدل‌سازی عدم قطعیت مصارف گرهی از روش برش فازی و برای صحت‌سنجی روش از مونت کارلو استفاده شده است. نتایج نشان داد که با استفاده از برخی اطلاعات اضافی اندازه‌گیری شده می‌توان رویکرد جدیدی را برای کاهش عدم قطعیت‌ها فراهم کرد. Lansey (۲۰۰۹) تأثیر عدم قطعیت زبری لوله‌ها در طراحی مدل شبکه توزیع آب برای توسعه یک مدل واقعی را بررسی کردند که در آن از روش ممان دوم مرتبه اول (FOSM)^۱ برای تحلیل پارامترهای غیرقطعی استفاده شد. تخمین دقیق میانگین پارامترها و تغییرات آن نقش مهمی در افزایش دقت و کاهش هزینه‌های مدل‌سازی دارد.

Kang و همکاران (۲۰۰۹) روش‌های مختلف تخمین عدم قطعیت مدل با هدف کاهش محاسبات کامپیوتری را مقایسه کردند که در آن از روش ممان دوم مرتبه اول، مونت کارلو (MCS)^۲، شبه‌مونت کارلو (QMCS)^۳ و نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین (LHS)^۴ استفاده شده است. نتایج نشان داد که روش نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین نسبت به روش مونت کارلو تخمین‌های بهتری در شرایط جریان پایدار و ناپایدار دارد. همچنین روش ممان دوم مرتبه اول در شرایط جریان پایدار نتایج خوب ولی در شرایط جریان ناپایدار نتایج ضعیف دارد. همچنین تحلیل عدم قطعیت پارامترها در مدل هیدرولیکی و کیفی شبکه نشان داد که برای مدل هیدرولیکی عدم قطعیت مصارف گرهی و برای مدل کیفی عدم قطعیت مصارف گرهی و ضریب زوال دیواره بیشترین تأثیر را دارند.

سیف‌اللهی آغمیونی و همکاران (۱۳۹۰) تأثیر عدم قطعیت توأم نیاز گره‌ها و زبری لوله‌ها در کارایی هیدرولیکی شبکه‌های آب‌رسانی را بررسی کردند. برای این منظور، میزان انعطاف‌پذیری شبکه توزیع آب دوحلقه‌ای نسبت به تغییرات احتمالی هم‌زمان دو

4. Latin Hypercube Sampling
5. EPANET

1. First Order Second Moment
2. Monte Carlo Simulation
3. Quasi Monte Carlo Simulation

است. همچنین روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع آب کلیبر پیاده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل هیدرولیکی

جهت تحلیل هیدرولیکی شبکه توزیع آب، دو دیدگاه عمده تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار^۱ و تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضای ثابت^۲ وجود دارد. در روش تحلیل مبتنی بر فشار، بین دبی و فشار گرهی رابطه برقرار می‌شود به عبارت دیگر میزان دبی تخصیص یافته در گره‌ها تابعی از مقادیر فشار در گره‌ها می‌باشد. همچنین روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضای ثابت متداول‌ترین روش تحلیل شبکه است و بر فرض تقاضای ثابت در گره‌ها استوار است و مبنای بسیاری از نرم‌افزارهای تحلیل شبکه مثل ایپانت می‌باشد. در این مقاله از نرم‌افزار ایپانت برای تحلیل هیدرولیکی شبکه استفاده می‌شود که بر اساس روابط تجربی هیزن ویلیامز، افت هد در حلقه‌ها و پیوستگی جریان در گره‌ها و پایستگی انرژی کار می‌کند. در تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های توزیع آب، معمولاً مدل‌سازی شبکه در یک زمان مشخص در طول شبانه‌روز و یا به صورت زمان گسترده در طول شبانه‌روز انجام می‌شود. که در این تحقیق از تحلیل هیدرولیکی دوره گسترده استفاده می‌شود. برای بررسی عدم قطعیت پارامترهای مدل بر عملکرد هیدرولیکی شبکه، عدم قطعیت هم‌زمان سه پارامتر شامل ضریب هیزن ویلیامز و قطر لوله‌ها و مصارف گره‌ها به عنوان پارامترهای دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شد. ضریب هیزن ویلیامز و قطر لوله‌ها بر اساس معادله هیزن ویلیامز به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$h_f = \frac{1.68LQ^n}{C_{HW}^{1.852}D^{4.87}} \quad (1)$$

که در آن h_f افت هد در یک لوله (متر)، Q دبی جریان در یک لوله (مترمکعب بر ثانیه)، n توان دبی در رابطه است که برای رابطه هیزن ویلیامز برابر $1/852$ می‌باشد. همچنین L طول یک لوله (متر)، D قطر یک لوله (متر) و C_{HW} ضریب هیزن ویلیامز در یک لوله می‌باشد. مقادیر مصارف در گره‌ها بر اساس رابطه پیوستگی جریان در گره‌ها و از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\sum_{i=1}^{NPj} (Q_i) + q_j = 0 \quad (2)$$

که در آن Q_i دبی جریان در لوله i متصل به گره z ام (مترمکعب بر ثانیه)، NPj تعداد لوله‌های متصل به گره z ام و q_i مقدار مصرف در گره z ام (مترمکعب بر ثانیه) می‌باشد.

بررسی کردند که در آن ورودی‌های مدل شامل مصارف گرهی و ضریب زبری لوله‌ها و خروجی‌های مدل شامل فشار، سرعت و افت انرژی به صورت توابع عضویت فازی تعریف شدند. برای تحلیل هیدرولیکی شبکه از دو روش مبتنی بر تقاضا و مبتنی بر فشار استفاده شد. نتایج نشان داد که عملکرد شبکه دو حلقه‌ای بر اساس تحلیل مبتنی بر فشار برابر 59% که بیشتر از تحلیل مبتنی بر تقاضا برابر 26% است.

Geranmehr و همکاران (۲۰۱۹) تحلیل عدم قطعیت در شبکه‌های توزیع آب را بر اساس سه متغیر هد مخازن، مصارف گره‌ها و ضریب زبری لوله‌ها انجام دادند که در آن مقادیر حداقل و حداکثر هد در گره‌ها و سرعت جریان در لوله‌ها به عنوان متغیر خروجی ارزیابی شدند. برای مدل‌سازی عدم قطعیت از روش برش فازی و برای مدل‌سازی تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار شبکه از ترکیب شبیه‌ساز ایپانت و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نتایج نشان داد که سرعت شبکه بسیار تحت تأثیر عدم قطعیت سیستم است و تجمع عدم قطعیت‌های مختلف عملکرد شبکه را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد.

El-Ghandour و همکاران (۲۰۲۰) طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب در شرایط پایدار و شبه پایدار با اعمال عدم قطعیت برای ضرایب زبری لوله‌ها را بررسی کردند که در آن برای مدل‌سازی عدم قطعیت ضرایب از روش برش فازی و برای طراحی بهینه ابعاد شبکه از الگوریتم مجموعه ذرات استفاده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش عدم قطعیت داده‌ها، قابلیت اطمینان شبکه کاهش می‌یابد. همان طوری که مشخص است در تحقیقات قبلی روش‌های مختلف مدل‌سازی عدم قطعیت شامل روش مونت کارلو، شبه-مونت کارلو، برش فازی، روش ممان دوم مرتبه اول و ابرمکعب لاتین برای مدل‌سازی عدم قطعیت پارامترهای مختلف شامل ضریب زبری لوله‌ها، مصارف گره‌ها و هد مخازن و سایر پارامترها و همچنین تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا یا فشار برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان به کار برده شده است. در این تحقیق تأثیر هم‌زمان عدم قطعیت سه پارامتر ضریب زبری و قطر لوله‌ها و همچنین مصارف گره‌ها برای ارزیابی کارایی هیدرولیکی شبکه به صورت قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه بررسی می‌شود. برای تحلیل هیدرولیکی شبکه از تحلیل دوره گسترده و روش مبتنی بر تقاضا استفاده می‌شود. همچنین کارایی هیدرولیکی شبکه به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی ساعتی و سالانه احتمالاتی بر روی یک شبکه واقعی ارائه می‌شود که از نوآوری‌های تحقیق به حساب می‌آیند. برای این منظور از لینک شبیه‌ساز هیدرولیکی شبکه ایپانت و متلب و به دلیل توانمندی خوب و کاربر دوست بودن روش مونت کارلو از آن برای مدل‌سازی عدم قطعیت مدل استفاده شده

$$NPRI(j, t) = \begin{cases} 0 & P_{jt} < 10 \\ \frac{1}{32}(P_{jt} - 10) & 10 < P_{jt} < 26 \\ \frac{1}{10}(P_{jt} - 26) + 0.5 & 26 < P_{jt} < 31 \\ 1 & P_{jt} = 31 \\ -\frac{1}{38}(P_{jt} - 31) + 1 & 31 < P_{jt} < 50 \\ -\frac{1}{40}(P_{jt} - 50) + 0.5 & 50 < P_{jt} < 60 \\ 0.25 & 60 < P_{jt} \end{cases} \quad (7)$$

$$NPRI = \frac{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}(NPRI(j, t))}{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}} \quad (8)$$

که در آن $NPRI(j, t)$ مقدار شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی در گره j ام در زمان t و P_{jt} فشار گرهی در گره j ام در زمان t (متر) می‌باشد. که $NPRI$ شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه، NN تعداد گره‌های شبکه، $Q_{j,t}^{req}$ تقاضای مورد نیاز گره j ام در زمان t (مترمکعب بر ثانیه) می‌باشد.

۲-۴- عدم قطعیت پارامترها

برای تولید عدم قطعیت پارامترها مدل از روش مونت کارلو استفاده شده است. با تحلیل حساسیت، تعداد نمونه‌های تولید شده به روش مونت کارلو برای هر پارامتر برابر ۱۰۰۰۰ به دست آمد که بر اساس کمترین اختلاف بین متوسط نمونه‌ها با مقدار واقعی پارامتر تعیین شده است. برای تولید تصادفی پارامترها از توزیع نرمال استفاده شده است. تابع چگالی احتمال توزیع نرمال به صورت رابطه (۹) می‌باشد.

$$F_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad (9)$$

که μ_x میانگین متغیر x ، σ_x انحراف معیار استاندارد متغیر x $F_x(x)$ تابع چگالی احتمال متغیر x می‌باشد. ضریب تغییرات (CV) نسبت انحراف معیار یک متغیر دارای عدم قطعیت به میانگین آن را نشان می‌دهد که در این تحقیق مقدار آن به صورت ۱۰ و ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است (Seifollahi-Aghmiuni و همکاران، ۲۰۱۳a).

۲-۵- ساختار روش

روند نامی روش پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. در این روش بعد از انتخاب پارامترهای دارای عدم قطعیت، مقادیر آنها در سال مورد نظر در طول دوره طرح بر اساس روابط (۳)، (۴)، (۵) و (۶) تعیین می‌شود. این مقادیر قطعی هستند. مقادیر غیرقطعی این پارامترها در قالب روش مونت کارلو با استفاده از توزیع نرمال برای پارامترهای ضریب هیزن ویلیامز و مصارف گره و با استفاده از تابع توزیع ریسک برای قطر لوله‌ها تولید می‌شود. این مقادیر به مدل شبیه‌ساز شبکه ایپانت اعمال می‌شود و مقادیر فشار

۲-۲- تخمین پارامترها در دوره طرح

هر یک از پارامترهای ورودی مدل باید در دوره طرح مدل تخمین زده شوند که این مسئله می‌تواند با اعمال عدم قطعیت و یا بدون آن باشد که در این تحقیق بدون اعمال عدم قطعیت به روند تغییرات مدل‌سازی انجام شده است. برای مدل‌سازی تغییرات ضریب هیزن ویلیامز در طول زمان از رابطه (۳) استفاده شده است (Walski و Sharp، ۱۹۹۸).

$$C_{HW}(i, t) = 18 - 37.2 \log \left(\frac{(e_{0i} + a_i(t + g_i))}{D_i} \right) \quad (3)$$

که $C_{HW}(i, t)$ ضریب هیزن ویلیامز لوله i در سال t ، e_{0i} زبری اولیه در لوله i در زمان نصب لوله وقتی که تازه بوده، a_i درجه رشد زبری در لوله i ، g_i سن لوله i در سال پایه، t زمان سپری شده سالانه، D_i قطر لوله i (متر)، Np تعداد لوله موجود در شبکه و T دوره بهره‌برداری می‌باشد. همچنین تغییرات تقاضا در شبکه بر اساس معادله رشد هندسی طی دوره بهره‌برداری به دست آمده است (تائبی و چمنی، ۱۳۹۰).

$$q(j, t) = q(j, 0) \text{Exp}(K_g t) \quad (4)$$

که $q(j, t)$ تقاضای گرهی در گره j در سال t ، $q(j, 0)$ تقاضای گرهی در گره j در سال صفر (مترمکعب بر ثانیه)، K_g میزان رشد هندسی تقاضا در هر سال (یک بر سال) می‌باشد و در نهایت برای محاسبه عدم قطعیت مربوط به گرفتگی قطر لوله‌ها که به دلیل رسوب‌گذاری و سایر عوامل در طول دوره فعالیت اتفاق می‌افتد، ریسک گرفتگی در دوره طرح T سال از معادله (۵) به دست می‌آید و بعد از آن قسمت باز قطر داخلی لوله از معادله (۶) محاسبه می‌شود (Obeysekera و Salas، ۲۰۱۴).

$$R(t) = 1 - (1 - 1/T)^t \quad (5)$$

$$D(i, t) = D(i, 0) - r_D D(i, 0) R(t) \quad (6)$$

که $D(i, t)$ قطر لوله i در سال t ، $D(i, 0)$ قطر لوله i در سال صفر (متر)، r_D نسبتی از قطر داخلی لوله که در طول دوره بهره‌برداری ممکن است، مسدود شود.

۲-۳- کارایی هیدرولیکی شبکه

برای ارزیابی کارایی هیدرولیکی شبکه از شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه به صورت روابط (۷) و (۸) استفاده شده است (دینی و تابش، ۱۳۹۷). این روابط در تحقیقات مختلف دیگر نیز برای ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب به کار برده شده است (Tabesh و Dini، ۲۰۱۹؛ Dini و Asadi، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰).

کلبر دارای اختلاف ارتفاع زیاد بوده و از شرایط خاصی برخوردار است. شبکه توزیع آب کلبر دارای ۱۷۴ لوله و ۱۶۶ گره، ۷ فشارشکن و یک مخزن است که برای اولین بار در مقاله محمدی کلبر و همکاران (۱۳۹۹) ارائه شده است. ساختار شماتیک شبکه در شکل (۲) و ضرایب الگوی مصرف ساعتی شبکه در جدول (۱) نشان داده شده است. بر اساس داده‌های جدول مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط مصرف شبکه در ساعت‌های ۳، ۱۲ و ۲۲ اتفاق می‌افتد که به ترتیب برابر ۰/۵۷، ۱/۳۹ و ۱/۰۲ می‌باشد.

جدول ۱- ضریب الگوی مصرف ساعتی شبکه کلبر

ساعت	ضریب	ساعت	ضریب	ساعت	ضریب
۱	۰/۶۴	۹	۱/۱۹	۱۷	۱/۱۹
۲	۰/۵۹	۱۰	۱/۲۹	۱۸	۱/۱۸
۳	۰/۵۷	۱۱	۱/۳۶	۱۹	۱/۱۵
۴	۰/۵۸	۱۲	۱/۳۹	۲۰	۱/۱۱
۵	۰/۶۱	۱۳	۱/۳۴	۲۱	۱/۰۵
۶	۰/۷۲	۱۴	۱/۲۴	۲۲	۱/۰۲
۷	۰/۸۳	۱۵	۱/۱۴	۲۳	۰/۹۴
۸	۰/۹۶	۱۶	۱/۱۲	۲۴	۰/۷۷

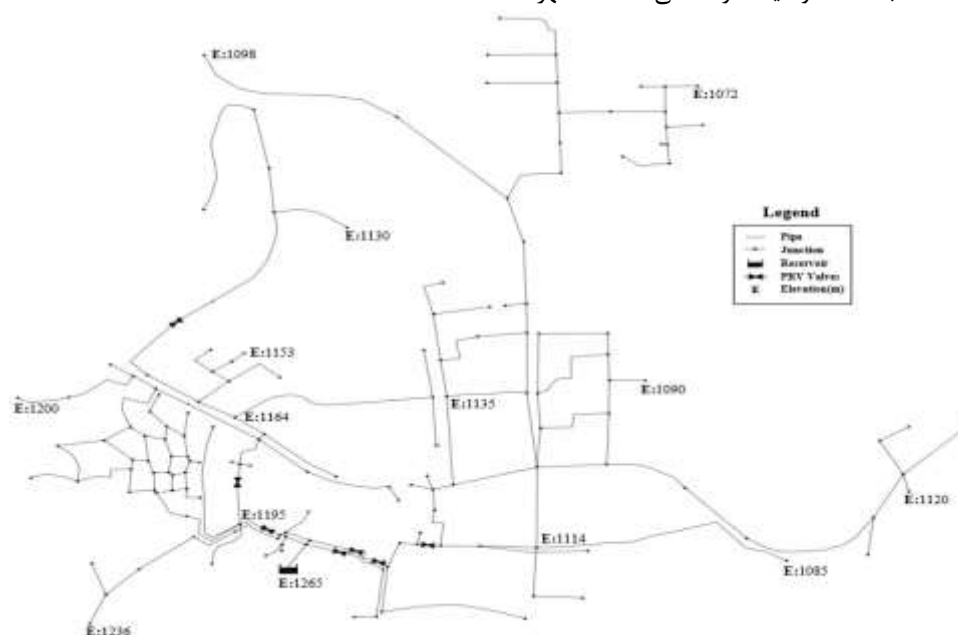
در گره‌های شبکه محاسبه می‌شود. با اعمال مقادیر فشار گرهی در روابط قابلیت اطمینان شبکه، مقادیر کارایی شبکه محاسبه و به صورت نقشه‌های پهنه‌بندی احتمالاتی تهیه می‌شود.



شکل ۱- روندنمای روش پیشنهادی

۳- مطالعه موردی

برای تشریح روش پیشنهادی از شبکه توزیع آب شهر کلبر استفاده شده است. شهر کلبر دارای جمعیت ۱۰۰۰۰ نفری است که در ۱۵۰ کیلومتری شمال شرق تبریز در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. به علت موقعیت کوهستانی منطقه، شهر

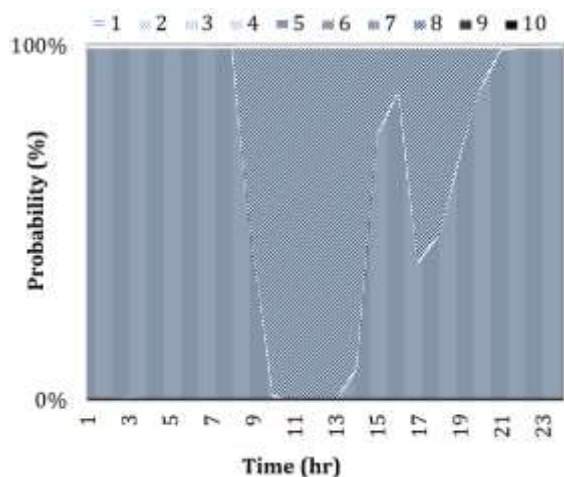


شکل ۲- طرح شماتیک شبکه توزیع آب کلبر

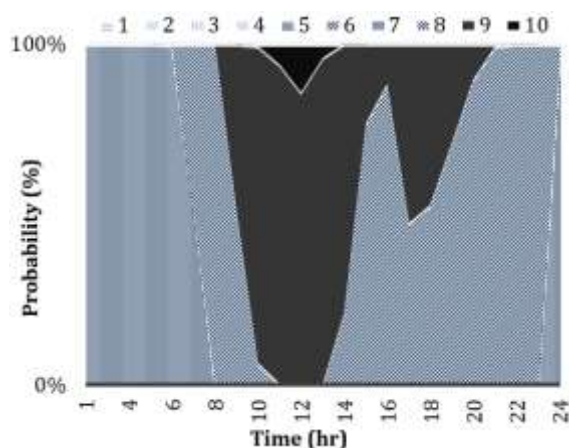
محاسبه گردید و این مقادیر در قالب سطوح سرویس شبکه در ده دسته مجزا بر اساس شاخص قابلیت اطمینان با بازه نامساوی دسته‌بندی شدند. در جدول (۲) سطوح سرویس شبکه از ۱ تا ۱۰ و بازه تغییرات قابلیت اطمینان شبکه برای آن‌ها نشان داده شده است.

۴- بحث و نتایج

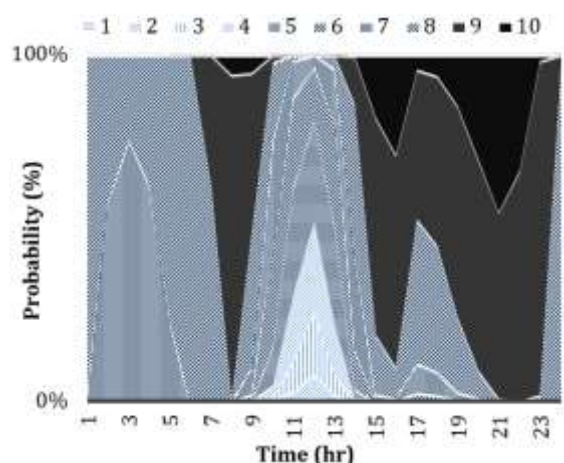
برای بررسی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب شهر کلبر، با اعمال عدم قطعیت هم‌زمان سه پارامتر ضریب همزن ویلیامز و قطر لوله‌ها و مصارف در گره‌ها با دو حالت ضریب تغییرات برابر ۱۰ و ۲۰ درصد، مقادیر شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه



شکل ۳- پهنه‌بندی احتمالاتی عملکرد شبکه در سال اول



شکل ۴- پهنه‌بندی احتمالاتی عملکرد شبکه در سال پانزدهم



شکل ۵- پهنه‌بندی احتمالاتی عملکرد شبکه در سال سی‌ام

همان‌طوری که از شکل (۳) و جدول (۳) مشخص است در سال اول در هیچ‌یک از ساعت‌ها در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز، شبکه عملکرد قابل قبول ندارد.

جدول ۲- سطوح سرویس و بازه تغییرات قابلیت اطمینان

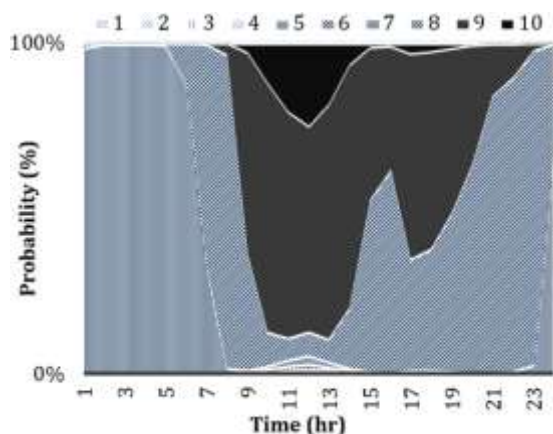
سطح سرویس	بازه تغییرات
۱	۰/۱۰۰-۰/۱۵
۲	۰/۱۵-۰/۲۰
۳	۰/۲۰-۰/۲۵
۴	۰/۲۵-۰/۳۰
۵	۰/۳۰-۰/۳۵
۶	۰/۳۵-۰/۴۰
۷	۰/۴۰-۰/۴۵
۸	۰/۴۵-۰/۵۰
۹	۰/۵۰-۰/۵۵
۱۰	۰/۵۵-۱/۰۰

با توجه به این‌که مقادیر قابلیت اطمینان فشار گرهی بیشتر از ۰/۵ یک عملکرد قابل قبول و برای مقادیر کمتر از ۰/۵ غیرقابل قبول است، در جدول فوق سطوح سرویس‌دهی ۹ و ۱۰ سطوح عملکرد قابل قبول و سایر سطوح سرویس‌دهی غیرقابل قبول است. در ادامه نتایج برای هر دو حالت تشریح می‌شود.

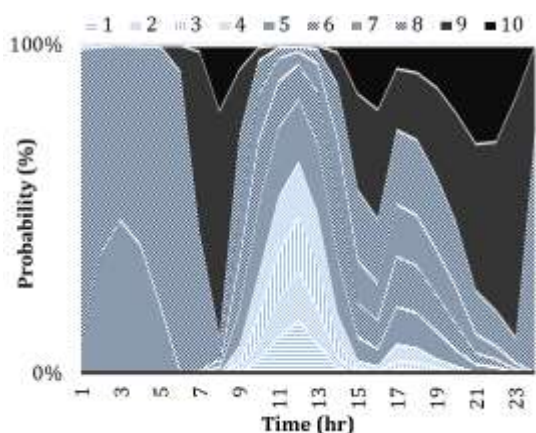
۱-۴- ضریب تغییرات ۱۰ درصد

در این بخش کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب کلیبر بر اساس تغییرات غیرقطعی و هم‌زمان پارامترهای ضریب هیزن و بلیامز و قطر لوله‌ها و مصارف گره‌ها و با ضریب تغییرات ۱۰ درصد موردبررسی قرار می‌گیرد. مدل شبکه توزیع آب کلیبر به‌صورت دوره گسترده برای ۲۴ ساعت شبانه‌روز و در طول دوره بهره‌برداری شبکه برای ۳۰ سال موردبررسی قرار گرفته است. در ضمن مدل اولیه شبکه بر اساس داده‌های میدانی فشار گرهی و دبی جریان لوله‌ای کالیبره شده و مدل کالیبره شده برای این تحقیق به کار برده شده است. نتایج مربوط به کالیبراسیون و مدل‌سازی شبکه در تحقیقات دیگر ارائه شده است (محمدی کلیبر و همکاران، ۱۳۹۹).

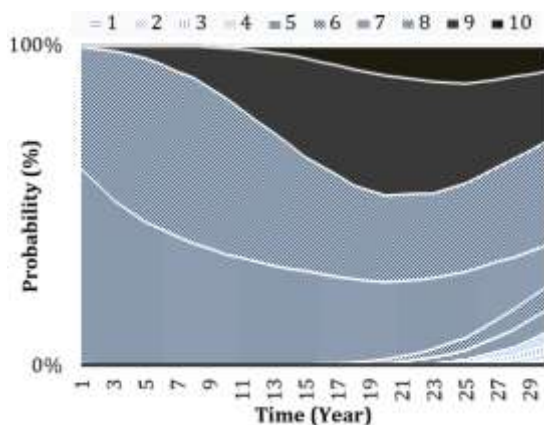
در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) نقشه‌های پهنه‌بندی سطوح سرویس شبکه کلیبر به‌صورت ساعتی برای سال‌های اول، پانزده و سی با ضریب تغییرات ۱۰ درصد نشان داده شده است. در این شکل‌ها پهنه‌های بدون هاشور نشان‌دهنده سطوح عملکرد قابل قبول و پهنه‌های با خطوط هاشور قائم نشان‌دهنده سطوح عملکرد غیرقابل قبول است. همچنین پهنه‌های با رنگ تیره عملکرد بهتر نسبت به پهنه‌های با رنگ روشن را نشان می‌دهند. همچنین در جدول (۳) بازه تغییرات احتمالاتی سطوح سرویس شبکه برای ساعت‌های حداقل (ساعت ۳)، حداکثر (ساعت ۱۲) و متوسط مصرف (ساعت ۲۲) آورده شده است.



شکل ۸- پهنه‌بندی احتمالاتی عملکرد شبکه در سال پانزده



شکل ۹- پهنه‌بندی احتمالاتی عملکرد شبکه در سال سی



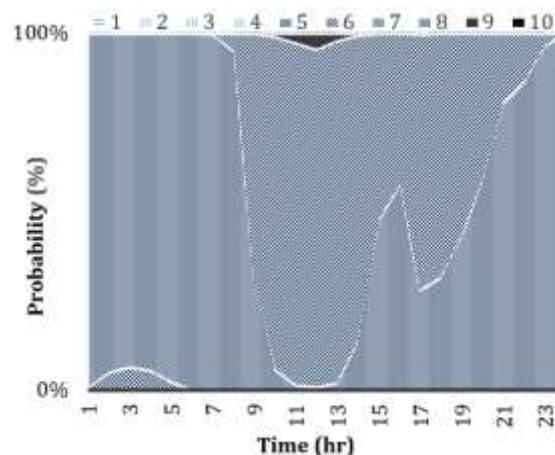
شکل ۱۰- پهنه‌بندی احتمالاتی عملکرد شبکه در طول دوره بهره‌برداری

بررسی نتایج در حالت ضریب تغییرات ۲۰ درصد نشان می‌دهد که مشابه حالت ۱۰ درصد، در سال اول و پانزده، بهترین عملکرد شبکه در ساعت حداکثر مصرف و بدترین عملکرد در ساعت حداقل مصرف شبکه و در سال سی، بهترین عملکرد در ساعت متوسط مصرف و بدترین عملکرد در ساعت حداکثر مصرف شبکه اتفاق می‌افتد.

همچنین جزئیات عملکرد احتمالاتی سالانه شبکه در طول دوره بهره‌برداری آن‌ها در جدول (۴) آورده شده است. در این جدول عملکرد احتمالاتی شبکه برای سال‌های ۱، ۱۵، ۲۳ (به- عنوان بهترین سال عملکرد شبکه) و ۳۰ آورده شده است. بر اساس نتایج جدول (۴)، بیشترین احتمال سرویس‌دهی برای سال اول، سطح سرویس ۷ با احتمال ۶۹ درصد، برای سال ۱۵، سطح سرویس ۸ با احتمال ۴۰ درصد، برای سال ۲۳، سطح سرویس ۹ با احتمال ۴۵ درصد و برای سال ۳۰، سطح سرویس ۸ با احتمال ۳۳ درصد می‌باشد که تأکیدی بر روند افزایش کارایی شبکه از سال اول تا سال ۲۳ و مجدداً کاهش کارایی شبکه از سال ۲۳ تا ۳۰ می‌باشد.

۴-۲- ضریب تغییرات ۲۰ درصد

در این بخش کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب کلیبر بر اساس تغییرات غیرقطعی و همزمان پارامترهای ضریب هیزن و بلیامز و قطر لوله‌ها و مصارف گره‌ها و با ضریب تغییرات ۲۰ درصد مورد بررسی قرار می‌گیرد که در آن عدم قطعیت پارامترها بیشتر شده است، اما تمامی فرضیات مشابه حالت ضریب تغییرات ۱۰ درصد می‌باشد. در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) نقشه‌های پهنه‌بندی سطوح سرویس شبکه کلیبر به صورت ساعتی برای سال‌های اول، پانزده و سی و در شکل (۱۰) به صورت سالانه برای دوره بهره‌برداری شبکه با ضریب تغییرات ۲۰ درصد نشان داده شده است. همچنین در جدول (۵) بازه تغییرات احتمالاتی سطوح سرویس شبکه برای ساعت‌های حداقل (ساعت ۳)، حداکثر (ساعت ۱۲) و متوسط مصرف (ساعت ۲۲) و در جدول (۶) جزئیات عملکرد احتمالاتی سالانه شبکه در طول دوره بهره‌برداری آن‌ها برای ضریب تغییرات ۲۰ درصد آورده شده است.



شکل ۷- پهنه‌بندی احتمالاتی عملکرد شبکه در سال اول

سطوح سرویس ۹ و ۱۰ به ترتیب با احتمال ۵۱ و ۲۹ درصد قرار دارد و در بدترین حالت در ساعت حداکثر مصرف از شبکه، عملکرد شبکه با احتمال بیش از ۹۹ درصد غیرقابل قبول است که بیشتر در سطوح سرویس ۱ تا ۶ قرار دارد.

بررسی روند تغییرات متوسط سالانه سطوح سرویس شبکه در شکل (۱۰) و جدول (۵) نشان می‌دهد که عملکرد شبکه در سال‌های اول دوره با احتمال بیش از ۹۸ درصد غیرقابل قبول است، با بالا رفتن سن شبکه و در سال‌های میانی دوره طرح عملکرد شبکه بهتر شده به طوری که در سال پانزدهم، بیست عملکرد شبکه با احتمال به ترتیب ۳۵ و ۴۶ درصد قابل قبول می‌شود و در نهایت رو به سال‌های انتهای دوره طرح مجدداً عملکرد شبکه بدتر شده به طوری که در سال سی عملکرد شبکه با احتمال ۳۰ درصد قابل قبول می‌باشد. در مجموع بر اساس نتایج در حالت ضریب تغییرات ۲۰ درصد، بهترین عملکرد شبکه در طول سی سال دوره بهره‌برداری در سال بیست اتفاق می‌افتد که نسبت به حالت ضریب تغییرات ۱۰ درصد سه سال زودتر می‌باشد.

۴-۳- تفسیر نتایج

بررسی پهنه‌بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب کلیبر با ضریب تغییرات ۱۰ و ۲۰ درصد نشان می‌دهد که روند عمومی تغییرات در سال‌های همسان، شبیه هم است. به طوری که در سال‌های اول و پانزدهم، بهترین عملکرد در ساعت حداکثر مصرف و بدترین عملکرد در ساعت حداقل مصرف اتفاق می‌افتد. در حالی که در سال سی‌ام، بهترین عملکرد در زمان متوسط مصرف و بدترین عملکرد در زمان حداکثر مصرف اتفاق می‌افتد. علت این رفتار مربوط به تغییرات فشار در گره‌های شبکه است، با توجه به این که ابعاد شبکه‌های توزیع آب در ایران برای آخر دوره طرح محاسبه می‌شوند در اول دوره معمولاً ابعاد بزرگ‌تری نسبت به دبی عبوری از آن‌ها دارند و این موضوع در ساعت‌های حداقل مصرف تشدید نیز می‌شود. از این رو در این ساعت‌ها افت هد در شبکه به شدت کاهش و مازاد فشار افزایش می‌یابد و باعث می‌شود قابلیت اطمینان فشار گرهی و سطح سرویس‌دهی شبکه به شدت پایین آید. در مقابل در ساعت‌های حداکثر مصرف دبی عبوری و متناسب با آن افت هد بیشتر شده و مازاد فشار کاهش می‌یابد و باعث می‌شود قابلیت اطمینان فشار گرهی و سطح سرویس‌دهی شبکه به طور نسبی افزایش پیدا کند. با افزایش عمر شبکه و در سال‌های میانی با توجه به افزایش سن لوله‌ها و همچنین گرفتگی احتمالی قطر داخلی لوله‌ها و افزایش مصرف در گره‌ها، میزان افت هد در ساعت‌های حداقل و حداکثر مصرف به تناسب نسبت به سال‌های اول افزایش می‌یابد و همین مسئله باعث افزایش قابلیت اطمینان فشار گرهی و سطح سرویس‌دهی در سال‌های میانی می‌شود، این در حالی است که موقعیت ساعت‌های با عملکرد

جدول ۵- سطح سرویس‌دهی شبکه در زمان حداقل، متوسط و حداکثر مصرف در سال‌های ۱، ۱۵ و ۳۰ (درصد)

سال	۱	۱۵	۳۰
ساعت	۳	۱۲	۲۲
۱	۰	۰	۱۶
۱	۰	۰	۱۵
۳	۰	۰	۱۷
۴	۰	۰	۱۷
۵	۰	۱	۱۹
۶	۰	۱	۱۱
۷	۹۳	۸۶	۴
۸	۰	۱۴	۱۱
۹	۰	۰	۵۱
۱۰	۰	۰	۲۵

جدول ۶- متوسط سطح سرویس‌دهی سالانه شبکه (درصد)

سرویس/سال	۱	۱۵	۲۰	۳۰
۱	۰	۰	۰	۲
۲	۰	۰	۰	۲
۳	۰	۰	۰	۳
۴	۰	۰	۰	۴
۵	۰	۱	۰	۷
۶	۱	۰	۱	۷
۷	۶۱	۲۹	۲۴	۱۳
۸	۳۸	۳۶	۲۷	۳۲
۹	۱	۳۱	۳۷	۲۲
۱۰	۰	۴	۹	۸

هرچند از نظر بازه تغییرات سطوح سرویس بین دو حالت تفاوت وجود دارد. در مجموع در این حالت در سال اول، شبکه در بهترین حالت در ساعت حداکثر مصرف (ساعت ۱۲) در حدود ۴ درصد عملکرد قابل قبول دارد و عملکرد شبکه بیشتر در سطوح سرویس ۸ و ۹ به ترتیب با احتمال ۹۵ و ۴ درصد قرار دارد. در همین سال در بدترین حالت عملکرد شبکه در ساعت حداقل مصرف (ساعت ۳) با احتمال بیش از ۹۹ درصد غیرقابل قبول است و عملکرد شبکه بیشتر در سطوح سرویس ۷ و ۶ به ترتیب با احتمال ۹۳ و ۷ درصد قرار دارد. در سال پانزدهم، در بهترین حالت و در ساعت حداکثر مصرف، عملکرد شبکه بیش از ۸۷ درصد قابل قبول می‌باشد که در آن بیشترین سرویس‌دهی شبکه در سطوح سرویس ۹ و ۱۰ به ترتیب با احتمال ۶۲ و ۲۵ درصد قرار دارد و در بدترین حالت و در ساعت حداقل مصرف، عملکرد شبکه با احتمال بیش از ۹۹ درصد غیرقابل قبول است که در سطح سرویس ۷ قرار دارد. در نهایت در سال سی‌ام، در بهترین حالت و در ساعت متوسط مصرف، عملکرد شبکه بیش از ۸۰ درصد قابل قبول می‌باشد که در آن بیشترین سرویس‌دهی شبکه در

در مجموع سرویس دهی نامناسب شبکه از سال های اول تا سال های میانی نیاز به برنامه ریزی بهره برداری مناسب از شبکه دارد، در حالی که سرویس دهی نامناسب شبکه در سال های انتهایی دوره طرح نیاز به برنامه ریزی بازسازی و نوسازی شبکه دارد.

در مجموع پهنه بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه با ضرایب تغییرات متفاوت کمک می کند تا سال های بحرانی بهره برداری از شبکه شناسایی شود و بهتر است با به کارگیری حالت های مختلف عدم قطعیت ها مدل، به جای یک سال مشخص، بازه بحرانی شناسایی شود. بر این اساس در این تحقیق بازه سال های ۲۰ تا ۲۳ از شروع دوره بهره برداری به عنوان سال های بحرانی بهره برداری از شبکه می باشد. همچنین پهنه بندی احتمالاتی افق دقیق تری از سطوح کارایی و محدوده های تغییرات آن ها در طول روز و دوره بهره برداری شبکه به وجود می آورد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، پهنه بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه توزیع آب شهر کلیبر با اعمال عدم قطعیت هم زمان پارامترهای مدل شامل ضریب هیزن ویلیامز و قطر لوله ها و مصارف گره های شبکه بررسی شده است. برای این منظور از روش مونت کارلو برای مدل سازی عدم قطعیت پارامترها با توزیع احتمال نرمال و توزیع ریسک و از شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه برای ارزیابی کارایی هیدرولیکی شبکه استفاده شده است. مدل سازی در محیط متلب و با لینک با نرم افزار ایپانت به عنوان شبیه ساز شبکه انجام شده است. کارایی هیدرولیکی شبکه به صورت نقشه های پهنه بندی ساعتی در روز و سالانه در طول دوره بهره برداری شبکه تهیه شده است که حاوی اطلاعات مربوط به سطوح عملکرد شبکه به همراه احتمال وقوع آن ها می باشد. تمامی سطوح با قابلیت اطمینان بیشتر از ۰/۵ عملکرد قابل قبول دارند که بر این اساس برای شبکه توزیع آب شهر کلیبر سطوح سرویس ۹ و ۱۰ عملکرد قابل قبول دارند.

بررسی نتایج پهنه بندی احتمالاتی کارایی هیدرولیکی شبکه به صورت ساعتی نشان می دهد که شبکه در سال های اول تا اواسط دوره بهره برداری در ساعت های حداکثر مصرف و در سال های آخر دوره بهره برداری در ساعت های متوسط مصرف، سطوح سرویس دهی بالاتر با احتمال وقوع بیشتر را دارد. همچنین بررسی نتایج پهنه بندی احتمالاتی شبکه به صورت سالانه نشان می دهد که شبکه در حالت ضریب تغییرات ۱۰ درصد در سال ۲۳ و در حالت ضریب تغییرات ۲۰ درصد در سال ۲۰ سطوح سرویس دهی بالاتر با احتمال وقوع بیشتر را دارد. به طور کلی بررسی نقشه های پهنه بندی هیدرولیکی شبکه در ساعت های مختلف در طول یک شبانه روز و در سال های مختلف در طول دوره بهره برداری، امکان

بهترین و بدترین تغییر نمی کند. با افزایش بیشتر عمر شبکه و در سال های پایانی لوله های شبکه به سمت فرسودگی پیش می روند، هم زمان احتمال گرفتگی لوله ها به شدت افزایش می یابد و مصرف نیز به مقادیر حداکثر خودش می رسد و باعث می شود که افت هد شبکه به صورت فزاینده افزایش یابد و عملکرد شبکه را که در ساعت حداکثر مصرف بهترین شرایط را داشت به بدترین شرایط تغییر دهد. در سال های انتهایی دوره طرح در ساعت های حداقل و حداکثر، به ترتیب مازاد و کمبود فشار وجود دارد ولی در ساعت متوسط مصرف فشار به صورت نسبی متعادل است و بهترین عملکرد شبکه در این ساعت اتفاق می افتد. از طرفی تمایز بین دو حالت با ضریب تغییرات ۱۰ و ۲۰ درصد در میزان احتمال عملکرد قابل قبول شبکه و تعداد بازه های سرویس دهی در هر سال است که به طور متوسط در ضریب تغییرات ۲۰ درصد بیشتر از ضریب تغییرات ده درصد است و این مسئله ناشی از تأثیر عدم قطعیت های بیشتر در ضریب تغییرات ۲۰ درصد نسبت به ضریب تغییرات ۱۰ درصد می باشد.

بررسی روند تغییرات متوسط سالانه عملکرد هیدرولیکی شبکه توزیع آب کلیبر در حالت ضریب تغییرات ۱۰ و ۲۰ درصد نشان می دهد که روند عمومی تغییرات در طول دوره بهره برداری یکسان است. بدین صورت که احتمال سرویس دهی قابل قبول شبکه با افزایش عمر شبکه ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد که مربوط به تغییرات فشار در گره های شبکه است که در بخش قبلی به صورت کامل تشریح شده است. از طرف دیگر، در سال با بیشترین احتمال سرویس دهی قابل قبول برای دو حالت اختلاف وجود دارد. به طوری که برای ضریب تغییرات ۱۰ درصد در سال ۲۳ و برای ضریب تغییرات ۲۰ درصد در سال ۲۰ اتفاق می افتد. این مسئله ناشی از تأثیر میزان عدم قطعیت پارامترها می باشد که نشان می دهد با افزایش عدم قطعیت پارامترها دوره عمر بهره برداری شبکه می تواند کاهش یابد. بدین ترتیب که در سال های اولیه دوره بهره برداری، شبکه کلیبر بر اساس شاخص قابلیت اطمینان فشار گرهی شبکه، سطح سرویس دهی خوبی ندارد ولی این به معنی عدم سرویس دهی نیست، چرا که در این سال ها شبکه از مازاد فشار مشکل دارد که منجر به شکست، نشست، هزینه انرژی بالا و ... می شود، ولی مصرف کنندگان تقاضای مورد نیاز خود را دریافت می کنند و نارضایتی اجتماعی محسوسی وجود ندارد و مشکل مازاد فشار را می توان با برنامه ریزی بهره برداری شیرآلات برطرف نمود. این در حالی است که در سال های انتهایی دوره طرح شبکه به دلیل کمبود فشار، سطح سرویس دهی مناسب ندارد که منجر به عدم تأمین تقاضا در بخش بزرگی از شهر در ساعت های مختلف می شود که می تواند نارضایتی اجتماعی قابل توجهی ایجاد کند. این مشکل به راحتی قابل حل نیست و نیاز به برنامه ریزی بازسازی و نوسازی در شبکه ها دارد.

- distribution network modeling", *Water Supply*, 2016, 16 (3), 599-610.
- Salas JD, Obeysekera J, "Revisiting the Concepts of Return Period and Risk for Non stationary Hydrologic Extreme Events", *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19, 554-568.
- Seifollahi-Aghmiuni S, Bozorg Haddad O, Omid MH, Mariño, MA, "Effects of pipe Roughness Uncertainty on Water Distribution Network Performance during its Operational Period", *Water Resource Management*, 2013a, 27, 1581-1599.
- Seifollahi-Aghmiuni S, Bozorg Haddad O, Omid MH, Mariño, MA, "Water Distribution Network Risk Analysis under Simultaneous Consumption Roughness Uncertainties", *Water Resource Management*, 2013b, 27, 2595-2610.
- Seifollahi-Aghmiuni S, Bozorg-Haddad O, Omid MH, Mariño MA, "Long-Term Efficiency of Water Networks with Demand Uncertainty", *Water Management*, 2011, 164 (WM3), 147-159.
- Sharp WW, Walski TM, "Predicting Internal Roughness in Water Mains", *American Water Works Association*, 1998, 80 (11), 34-40.
- Sivakumar P, Prasad, PK, Chandramouli S, "Uncertainty Analysis of Looped Water Distribution Networks Using linked EPANET-GA Method", *Water Resources Management*, 2015, 30 (1), 331-358.
- Sumer D, Lansey K, "Effect of Uncertainty on Water Distribution System Model Design Decisions", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2009, 135 (1), 38-47.
- تصمیم‌گیری در ارتباط با اعمال برنامه‌های بهره‌برداری یا بازسازی و نوسازی و تعیین بازه‌های بحرانی مدیریت شبکه را فراهم می‌کند.
- ### ۶- مراجع
- تابش م، عسگرزاده م، شیرزاد ا، "بررسی تاثیر عدم قطعیت داده‌ها و نوع شبیه‌سازی هیدرولیکی بر نتایج مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد شبکه‌های توزیع آب"، آب و فاضلاب، ۱۳۹۸، ۳۰ (۴)، ۳۳-۵۰.
- تابش م، چمنی م، "شبکه‌های توزیع آب شهری"، اصفهان، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۰.
- دینی م، تابش م، "ارائه شاخص قابلیت اطمینان جدید برای ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب"، مجله آب و فاضلاب، ۱۳۹۷، ۲۹ (۳)، ۱-۱۶.
- سیفاللهی آغمیونی س، بزرگ حداد ا، امید م ح، "بررسی تأثیر عدم قطعیت توأم نیاز گره‌ها و زبری لوله‌ها در کارایی شبکه‌های آبرسانی"، تحقیقات آب و خاک ایران، ۱۳۹۰، ۴۲ (۱)، ۳۵-۴۳.
- محمدی کلیدر ا، دینی م، نورانی و، هاشمی س، "چالش‌های صحت‌سنجی در مدل‌های شبکه توزیع آب واقعی (مطالعه موردی: شهر کلیدر)"، نوزدهمین کنفرانس ملی هیدرولیک ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۸-۲۷ بهمن، ۱۳۹۹.
- Branisavljevic N, Prodanovic D, Ivetic, M, "Uncertainty Reduction in Water Distribution Network modelling using system inflow data", *Urban Water Journal*, 2009, 6 (1), 69-79.
- Dini M, Asadi A, "Optimal Operational Scheduling of Available Partially Closed Valves for Pressure Management in Water Distribution Networks", *Water Resource Management*, 2020, 34 (8), 2571-2583.
- Dini M, Asadi A, "Pressure Management of Large-Scale Water Distribution Network Using Optimal Location and Valve Setting", *Water Resource Management*, 2019, 33 (14), 4701-4713.
- Dini M, Tanesh M, "Optimal renovation planning of water distribution networks considering hydraulic and quality reliability indices", *Urban Water Journal*, 2019, 16 (4), 249-258.
- EL-Ghandour HA, Elabd SM, Elbeltagi E, "Assessment of optimal water distribution systems design under steady-state and transient conditions due to pipe roughness uncertainty", *Ain Shams Engineering Journal*, 2020, 12 (4), 1-9.
- Geranmehr M, Asghari K, Chamani MR, "Uncertainty analysis of water distribution networks using type-2 fuzzy sets and parallel genetic algorithm", *Urban Water Journal*, 2019, 16 (3), 193-204.
- Kang DS, Pasha MFK, Lansey K, "Approximate methods for uncertainty analysis of water distribution systems", *Urban Water Journal*, 2009, 6 (3), 233-249.
- Lee HM, Yoo DG, Kang D, Jun H, Kim JH, "Uncertainty quantification of pressure-driven analysis for water

EXTENDED ABSTRACT

Probabilistic Zoning of Hydraulic Performance of Water Distribution Network by Applying Key Parameter Uncertainty

Mehdi Dini^{a,*}, Amin Mohammadikaleibar^b, Vahid Nourani^c, Saeed Hashemi^d

^a Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

^b Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

^c Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran

^d Jacobs Engineering Group, Toronto, Ontario, Canada

Received: 03 February 2021; Review: 05 May 2021; Accepted: 04 July 2021

Keywords:

EPANET, Hydraulic performance, Kaleybar WDN, MATLAB, Monte carlo simulation, NPRI, Uncertainty.

1. Introduction

Generally, the modeling of the Water Distribution Networks (WDNs) is done by the conventional methods that cause the outputs of the network are normally deterministic value by assuming certain inputs and parameters. But, in real ones, there are many uncertainties in model parameters. which causes, the results obtained by the conventional methods may not be satisfactory in practice, Therefore, the variation of key parameters in WDNs such as pipe roughness and diameter and also nodal demand can change nodal pressure and pipe flow that affected the performance of the network. However, by understanding the parameter uncertainties and how the uncertainties affect the accuracy of the model, the decision-makers can make the best decision that can prevent the WDNs from the unreliable events.

2. Methodology

2.1. Hydraulic simulation

Generally, the pipe head loss and the continuity equation at each node are calculated by equations (1-2).

$$h_f = \frac{1.68LQ^{1.852}}{C_{HW}^{1.852}D^{4.87}} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{NP_i} (Q_i) + q_j = 0 \quad (2)$$

Where h_f is the head loss in a pipe, L is the pipe length, Q is the pipe flow, C_{HW} is the Hazen Williams coefficient, D is the pipe diameter, NP_i is the number of pipes connected to node i , q_j is the nodal demand at node i .

2.2. Parameter estimation

To calculate changes of the Hazen-Williams coefficient in each operational period for modeling the effects of aging in pipe capacity in the distribution network, the equation proposed by Sharp and Walski (1988) is used:

* Corresponding Author

E-mail addresses: m.dini@azaruniv.ac.ir (Mehdi Dini), amin.mohammadikaleibar@gmail.com (Amin Mohammadikaleibar), nourani@tabrizu.ac.ir (Vahid Nourani), saeed.hashemi@jacobs.com (Saeed Hashemi).

$$C_{HW}(i, t) = 18 - 37.2 \log \left(\frac{(e_{0i} + a_i(t + g_i))}{D_i} \right) \quad (3)$$

where, $C_{HW}(i, t)$: is the Hazen-Williams coefficient of pipe i at year t , e_{0i} : initial roughness in pipe p at the time of installation when it was new, a_i : is the roughness growth rate in pipe i , g_i : is the age of pipe i at the present time (year); t = is the elapsed annual time (year), D_i : is the diameter of pipe i , Np : is the total number of existing pipes in the network and T : is the operational time period. The demand changes in the network are considered based on a geometrical growth equation during the operational period (Taebi and Chamani 2005):

$$q(j, t) = q(j, 0) \text{Exp}(K_g t), \quad (4)$$

Where $q(j, t)$ is the nodal demand in node j at year t , $q(j, 0)$ is the nodal demand in node j at year zero, K_g is the geometrical growth rate of demand during the time. Also to calculate the pipe diameter uncertainty, first, it was assumed that a little portion of the inner diameter of the pipe would be blocked during the operation period due to sedimentation and other factors. Therefore, the risk of occurrence during time t is obtained from the equation (5) (Salas and Obeysekera, 2014):

$$R(t) = 1 - (1 - 1/T)^{(t)} \quad (5)$$

Then the opened portion of the inner diameter of the pipes at year t can be calculated by equation (6):

$$D(i, t) = D(i, 0) - r_D D(i, 0) R(t) \quad (6)$$

Where $D(i, t)$ is the diameter of pipe i at year t , $D(i, 0)$ is the diameter of pipe i at year 0, r_D is the rate of the inner diameter of the pipe would be blocked during operation period.

2.3. Network reliability

To evaluate the effect of parameters uncertainty in the hydraulic performance of WDNs during its operational Period, Nodal pressure Reliability Index (NPRI) is used (Dini and Tabesh, 2017, 2019).

$$NPRI(j, t) = \begin{cases} 0 & P_{j,t} < 10 \\ \frac{1}{32}(P_{j,t} - 10) & 10 < P_{j,t} < 26 \\ \frac{1}{10}(P_{j,t} - 26) + 0.5 & 26 < P_{j,t} < 31 \\ 1 & P = 31 \\ -\frac{1}{38}(P_{j,t} - 31) + 1 & 31 < P_{j,t} < 50 \\ -\frac{1}{40}(P_{j,t} - 50) + 0.5 & 50 < P_{j,t} < 60 \\ 0.25 & 60 < P \end{cases} \quad (7)$$

$$NPRI = \frac{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req} (NPRI(j, t))}{\sum_{j=1}^{NN} Q_{j,t}^{req}} \quad (8)$$

Where; $P_{j,t}$ is the nodal pressure in node j at time t , $NPRI(j, t)$ is the pressure reliability index of node j at time t , $NPRI$ is the network reliability index, NN is the number of nodes, Q^{req} is the required demand in node j at time t .

2.4. Probability function

In the Normal PDF, mean and standard deviation of parameters have defined for normal PDF and then the probabilistic variable x , is calculated by equation (9) (Seifollahi-Aghmiuni et. al., 2013):

$$F_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Where μ_x is the mean of variable x , σ_x is the standard deviation of variable x , and $F_x(x)$ is the probability density function of variable x . The coefficient of variation (CV) is the ratio of the standard deviation of an uncertain variable to its mean, is used to evaluate the effects of uncertainty during the operational period. In this study two mode of CV with value of 10 and 20 percent is considered for evaluation of the uncertainty of the

parameters.

2.5. Procedure summary

Fig. 1. shows all the steps in the processing of uncertainty, proposed in this study.

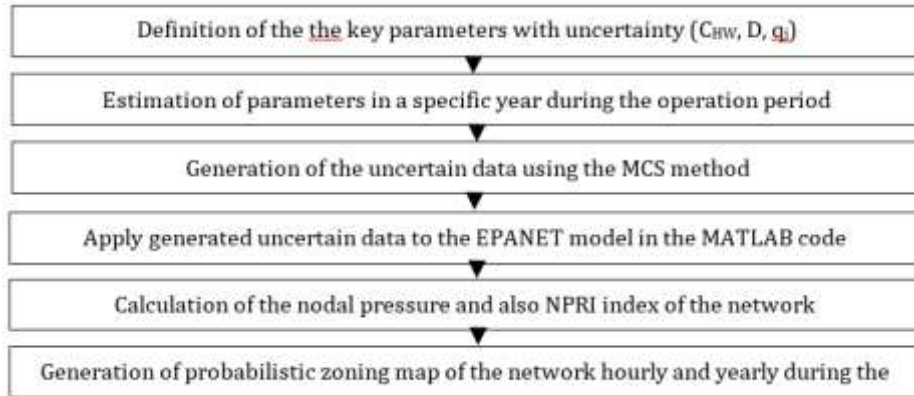


Fig. 1. Procedure summary

3. Results and discussion

In this section, the probabilistic performance zoning map of the Kaleybar WDN based on the NPRI index is done hourly all day long and yearly in the operational period, but, the yearly results are presented. In Figures 2 and 3 the probabilistic performance zoning map of the network is shown over the operational period with CV values of 10 and 20 percent. Comparison of the results for Figures 2 and 3 shows that the service levels of the Kaleybar network initially increases from the first year to midlife and then decrease to the end year in its operational period. However, there is a difference in the years with the highest probability of acceptable service for the two modes. While it happens for the CV value of 10 percent in the 23rd year and for the CV value of 20 percent in the 20th year. This is due to the effect of the uncertainty of the parameters, which shows that with increasing the uncertainty of the parameters, the best acceptable service life of the network can be decreased in its operational period.

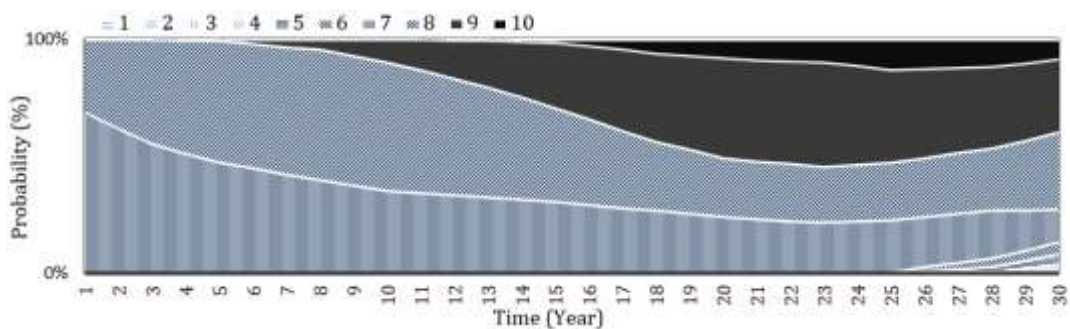


Fig. 2. Probabilistic performance zoning map of the network during the operation period (CV=10%)

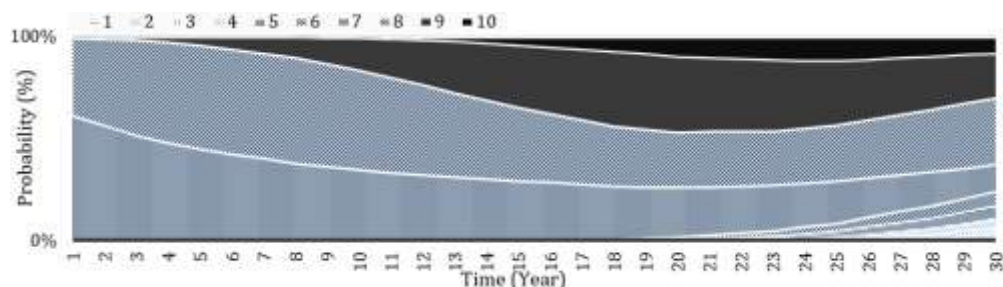


Fig. 3. Probabilistic performance zoning map of the network during the operation period (CV=20%)

4. Conclusions

In this paper, first, the uncertainty of key input parameters such as pipe diameter and roughness and also nodal demand was generated and then they were simultaneously applied to the model, and the hydraulic performance (NPRI index) of the network was evaluated. By defining network performance levels based on network reliability, probabilistic zoning maps were obtained hourly all day long and yearly in the operational period. For this purpose, the MCS method was used to simulate the parameter uncertainty, and the EPANET software was used to simulate the hydraulic performance of the network by programming in MATLAB. The study was performed on the Kaleybar WDN using different values of the Coefficient of Variation (CV). The results of yearly probabilistic zoning maps of the network showed that in the cases with a CV value of 10 and 20 percent, the network had an acceptable service level with a higher probability in the 23rd and 20th years respectively. In general, the study of hydraulic zoning maps of the network at different hours during a day and in different years during the operation period makes it possible to decide on the implementation of operational plans or reconstruction and renovation and also determine the critical operational years.

5. References

- Dini M, Tabesh M, "A New Reliability Index for Evaluating the Performance of Water Distribution Network", *Journal of Water and Wastewater*, 2017b, 29 (3), 1-16.
- Dini M, Tanesh M, "Optimal renovation planning of water distribution networks considering hydraulic and quality reliability indices", *Urban Water Journal*, 2019, 16 (4), 249-258.
- Salas JD, Obeysekera J, "Revisiting the Concepts of Return Period and Risk for Non stationary Hydrologic Extreme Events", *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19, 554-568.
- Seifollahi-Aghmiuni S, Bozorg Haddad O, Omid MH, Mariño, MA, "Effects of pipe Roughness Uncertainty on Water Distribution Network Performance during its Operational Period", *Water Resource Management*, 2013, 27, 1581-1599.
- Sharp WW, Walski TM, "Predicting Internal Roughness in Water Mains", *American Water Works Association*, 1998, 80 (11), 34-40.
- Taebi A, Chamani MR, "Urban water distribution networks", Second Edition, Publication Center of Isfahan Industrial University, Isfahan, 2005.