

کار آبی شبکه‌های آبرسانی تحت پدیده ضربه قوچ بر مبنای ضریب پایداری (مطالعه موردی شبکه آبرسانی شهرستان فریدونشهر)

فواد خواجه‌های زاد^{1*}، جواد احدیان²

تاریخ دریافت: 93/12/25 تاریخ پذیرش: 94/11/12

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

² استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Foad.khajehayzad@gmail.com

چکیده

پایداری شبکه‌های آبرسانی باید بر اساس خطرات ناشی از پدیده ضربه قوچ همواره مدنظر قرار گیرد. هدف از این پژوهش ارائه رویکردی جدید در تحلیل پدیده ضربه قوچ در شبکه‌های آبرسانی است. در روش‌های معمول، خسارت ناشی از ضربه قوچ بر اساس بیشینه فشار ایجاد شده برآورد می‌شود؛ حال آنکه در طی آن تداوم و تغییرات ضربه قوچی آب نسبت به زمان صرف‌نظر می‌شود. این پژوهش به دنبال پارامترهایی بوده که بتواند به صورت کمی، عملکرد شبکه‌ها را تحت پدیده ضربه قوچ بررسی نماید. بدین منظور اطلاعات مذکور از طریق پارامترهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و ترکیب آن‌ها، پارامتر پایداری موردبررسی قرار می‌گیرد. در این تحقیق تحلیل عددی پدیده ضربه قوچ در اثر قطع ناگهانی پمپ‌ها با استفاده از نرم‌افزار Hammer صورت گرفت. نتایج نشان داد که می‌توان از پارامتر پایداری برای ارزیابی کارایی شبکه‌های آبرسانی استفاده نمود. در اثر وقوع پدیده ضربه قوچ 4/83 درصد نقاط شبکه مورد مطالعه، ضریب پایداری کمتر از 1 داشتند. در اثر استفاده از سازه حفاظتی در بیشتر نقاط، افزایش پارامتر پایداری رخ داده و این مقدار به 1/11 درصد نقاط شبکه می‌رسد. همچنین افزایش ضریب هایزن و افزایش قطر لوله باعث افزایش پارامتر پایداری شده و کاهش این ضریب باعث کاهش پارامتر پایداری گردید.

واژه‌های کلیدی: پارامتر پایداری، سازه حفاظتی، شبکه‌های آبرسانی، ضربه قوچ، نرم‌افزار Hammer

Performance of Water Supply Networks under Water Hammer Phenomenon Based on Sustainability Coefficient (Case Study: Feridonshahr Water Supply Network)

F Khajehayzad ^{1*}, J Ahadiyan ^۲

Received: 26 April 2015

Accepted: 16 March 2015

¹- Msc. Student of Water Structure, Faculty of Water Sci., Engin., Shahid Chamran Univ., of Ahvaz (SCU), Iran

²- Assist. Prof., Dept. of Water Structures, Faculty of Water Sci., Engin., Shahid Chamran Univ., of Ahvaz (SCU), Iran

* Corresponding Author, Email: Foad.khajehayzad@gmail.com

Abstract

Sustainability of water supply networks should be based on the risks of water hammer phenomenon. The purpose of this study is to provide a new approach to the analysis of water hammer phenomenon in the water supply network. By conventional methods, the damage because of water hammer is estimated based on the maximum pressure at nodes. However, during this phenomenon continuation and changing of water hammer in overtime is ignored. In this study, quantitative parameters, to evaluate the network performance will be assessed under the water hammer phenomenon. Hence, the information through the parameters of reliability, resilience, vulnerability and their composition, sustainability parameters are analyzed. However, numerical analysis of water hammer phenomenon caused by sudden pump stop was done using HAMMER software. The results showed that the sustainability parameter can be used to evaluate the efficiency of water networks. In the event of water hammer phenomenon 4.83 percent of points of the studied network had sustainability factor less than one. So that use of protective structures increases sustainability parameter in most zones and this amount are 1.11 percent of the network nodes. Moreover, increasing and decreasing of Hazen coefficient and pipe diameter increases and decreases the sustainability parameter, respectively.

Keywords: Water supply network, Hammer software, Protective structure, Sustainability parameter, Water hammer

زودگذر و میرا موجب خطرات گوناگونی می‌شود. قدرت تخریبی این موج‌های فشاری به قدری است که همه ساله خسارات زیادی را بر سیستم‌های انتقال تحمیل می‌نماید (نجمائی 1369). این پدیده به‌طور عمده در اثر تغییر ناگهانی شرایط مرزی در سیستم‌های انتقال سیال مانند

مقدمه

در بعضی از سیستم‌های هیدرولیکی تحت فشار، نظیر خطوط انتقال آب، شبکه‌های توزیع و لوله‌های آب منتهی به سیستم‌های پمپاژ، توربین‌ها، تونل‌های آبی و جریان‌های ثقلی پدیده ضربه قوچ با ایجاد موج‌های سریع،

انتخاب گزینه برتر و قابل‌اجرا اقدام کند (هاشیموتو و همکاران 1982). در واقع با وارد کردن متغیرهای عملکردی ویژه مرتبط با خطر⁵ سامانه‌ها، گروه‌های تصمیم‌گیرنده قادر به درک بهتر چگونگی عملکرد شبکه در شرایط نامشخص آینده، شرایط شکست و اختلال شبکه در اختیار طراح قرار می‌دهند. این واقعیت که در یک طراحی مناسب باید تعادل خوبی بین هزینه اجرا و خطراتی که در آینده ممکن است رخ دهد برقرار باشد، به‌طور گسترده‌ای مورد اذعان همگان قرار گرفته است. از زمان معرفی و توسعه روش طراحی مبتنی بر خطرپذیری در مهندسی آب بیش از چند دهه گذشته و این شیوه در این مدت خود را به‌عنوان یک روش مناسب که قادر است هر دو جنبه را پشتیبانی کند، معرفی کرده است. در رویکرد پیشنهادی این پژوهش از پارامترهایی استفاده شده است که بدون نیاز به برآورد هزینه خسارات که در پروژه‌های آبرسانی کاری پیچیده است بتوان نسبت به سطح پذیرش خطرپذیری هر یک از گزینه‌های طراحی اظهارنظر کرد (سان و همکاران 2011).

چادری (1987) بحث وسیعی در مورد ناپایداری هیدرولیکی و روش‌های موجود تحلیل آن انجام داد. وی همچنین در مورد روش‌های عملی مقابله با ضربه قوچ در ایستگاه‌های پمپاژ، نیروگاه‌های هسته‌ای و شبکه‌ها بحث کرده است. کوان (2007) به بررسی پدیده ضربه قوچ در سیستم لوله‌کشی پرداخت. او دو مدل عددی روش مشخصه‌ها⁶ و روش تقارن محوری⁷ را با داده‌های تجربی مقایسه کرد. نتایج نشان داد روش مشخصه‌ها پایداری بیشتری نسبت به روش تقارن محوری دارد. بترتون (2006) ضربه قوچ را در سیستم‌های لوله‌کشی خانگی مطالعه کرد. وی به‌صورت عددی به مقایسه

قطع ناگهانی پمپ یا توربین، باز و بسته شدن سریع دریچه‌ها یا شیر فلکه، استفاده از شیر یک‌طرفه نامناسب و پر کردن غیراصولی خطوط لوله ناشی می‌شود. با توجه به اینکه در اثر این پدیده، فشارهای مثبت و منفی شدیدی به‌وجود می‌آید لذا در طراحی، نگهداری و عملکرد سیستم‌های توزیع آب مهم است (احتشام‌منش 1389). بنابراین اتخاذ راهکارهای مناسب به‌منظور به‌کمینه رساندن اثرات زیان‌بار این پدیده در شبکه‌ها و سیستم‌های توزیع ضروری هست. به‌همین منظور در این پژوهش با استفاده از پارامترهای اعتمادپذیری¹، برگشت‌پذیری²، آسیب‌پذیری³ و پایداری⁴ به ارزیابی پدیده ضربه قوچ در شبکه‌های آبرسانی پرداخته شد. در عمل وضعیت بهره‌برداری از هر سامانه آبی مانند شبکه‌های توزیع آب را می‌توان به دو صورت رضایت‌بخش و نامطلوب (شکست) توصیف نمود. برای توصیف چگونگی عملکرد یک سامانه آبی، معیارهای متعددی ارائه شده است. از جمله عملکرد یک سامانه را می‌توان از سه دیدگاه مختلف موردبررسی قرار داد: با چه فراوانی سامانه دچار شکست می‌شود؟ (اعتمادپذیری)، هر بار که شکست رخ دهد سامانه چگونه به حالت رضایت‌بخش برمی‌گردد؟ (برگشت‌پذیری)، عواقب شکست احتمالی سامانه چقدر جدی است؟ (آسیب‌پذیری). این پارامترها می‌توانند در ارزیابی و انتخاب گزینه‌های طراحی یا سیاست‌های بهره‌برداری برای طیف گسترده‌ای از پروژه‌های آبی، مورد استفاده قرار گیرند. وارد کردن مفاهیمی چون اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و ترکیب آن‌ها پایداری به فرآیند تحلیل پدیده ضربه قوچ می‌تواند به طراح یا تصمیم‌گیرنده کمک کند تا با شناخت مناسب از عملکرد سناریوهای مختلف نسبت به

¹ Reliability

² Resiliency

³ Vulnerability

⁴ Sustainability

⁵ Risk

⁶ Method of characteristic

⁷ Axi-symmetrical model

نسبت به همه معیارهای عملکردی یا نسبت به همه پارامترهای یک معیار، پارامترهای اعتمادپذیری، برگشت-پذیری و آسیب‌پذیری را در قالب یک شاخص پایداری منحصر به فرد ترکیب نمود. به این ترتیب گزینه‌ای که دارای شاخص پایداری بیشتری است پایدارترین گزینه نسبت به معیار یا معیارهای عملکردی مورد نظر است. کارآموز و همکاران (2010) به آسیب‌پذیری دسته‌های مختلف یک سیستم آبی پرداختند و با استفاده از یک مدل دو بعدی به مینیم کردن توابع هدف در نظر گرفته شده و در نتیجه کاهش آسیب‌پذیری پرداختند. در کل نتیجه گرفتند اهمیت عوامل پیش‌گیرنده بیش از نوع استراتژی برخورد است. بنتس و همکاران (2011) با استفاده از نظریه جدیدی به آسیب‌پذیری بخش‌های مختلفی از شبکه‌های آبرسانی پرداختند. نظریه آسیب‌پذیری شبکه‌های آبرسانی (TVWPN)¹⁰ به صورت مدل سلسله مراتبی بخش‌های آسیب‌پذیر را شناسایی و به طور غیرمستقیم در افزایش عملکرد آن‌ها کمک می‌کند. کراکو و همکاران (2014) به ارزیابی دو شاخص آنتروپی¹¹ و برگشت‌پذیری در افزایش اعتمادپذیری در طراحی شبکه‌های توزیع پرداختند. آن‌ها یک تابع چند هدفه برای کاهش هزینه‌ها و افزایش اعتمادپذیری در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که شاخص برگشت‌پذیری از شاخص آنتروپی در برآورد اعتمادپذیری شبکه‌های توزیع بهتر است. پیراتلا و همکاران (2014) به ارزیابی برگشت‌پذیری شبکه‌های آبرسانی تحت پدیده زمین‌لرزه پرداختند و تأثیر جنس و قطر لوله‌ها را در میزان برگشت‌پذیری شبکه‌های آبرسانی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که لوله‌های آهنی در مقایسه با دیگر جنس‌ها دارای عملکرد ضعیف‌تری هستند و همچنین با کاهش قطر لوله‌ها، برگشت‌پذیری شبکه‌های آبرسانی تحت پدیده زمین‌لرزه کاهش می‌یابد.

شرایط ماندگار و غیرماندگار و وقوع پدیده ضربه قوچ پرداخت. جانگ و کارنی (2006) از مدل‌های الگوریتم ژنتیک⁸ و بهینه‌سازی ازدحام زنبور⁹ برای بهینه‌سازی خطوط انتقال آب و کاهش خسارات ناشی از ضربه قوچ استفاده کردند. در نهایت مدل الگوریتم ژنتیک نسبت به بهینه‌سازی ازدحام زنبور نتیجه بهتری داد. حسن‌زاده و همکاران (1382) وقوع پدیده ضربه قوچ را در یک ایستگاه پمپاژ فشار قوی مورد مطالعه قرار دادند و به بررسی ابزارهای مختلف کنترل فشار پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد محفظه هوا بهترین وسیله جهت کنترل فشارهای ناشی از ضربه قوچ هست. وو و همکاران (2011) ضربه قوچ را در شبکه بررسی و حدود تحمل شبکه نسبت به فشارهای اعمال شده از پدیده ضربه قوچ را پیشنهاد نمودند. فونتانو و همکاران (2012) در بررسی کاهش تلفات و تولید انرژی در شبکه‌های توزیع آب، یکی از علل مهم تلفات را رخداد ضربه قوچ و کاویتاسیون در شبکه معرفی نمودند. نظری رضایی (1393) به ارزیابی کارایی نرم‌افزارهای Hammer و Hytran و روش حل معادله ژاکوفسکی در تحلیل ضربه قوچ پرداختند. نتایج نشان داد که مقدار محاسبه شده فشار بیشینه توسط معادله ژاکوفسکی بیشتر از مقادیر به دست آمده از نرم‌افزارهای Hytran و Hammer بود.

هاشیموتو و همکاران (1982) کاربرد پارامترهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری در بررسی عملکرد سامانه‌های آبی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند این پارامترها برای توصیف عملکرد تصادفی و پویای سامانه‌های آبی مانند تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، سامانه‌های تأمین آب چند مخزنه و یا سامانه‌های پیش-بینی و کنترل سیل مناسب هستند. در ادامه لوکس (1997) به منظور رتبه‌بندی گزینه‌های مختلف یک پروژه آبی

¹⁰ Theory of vulnerability of water pipe networks¹¹ Entropy⁸ Genetic algorithm⁹ Particle swarm optimization

در حالت قطع ناگهانی پمپ‌ها و شرایط مرزی برای وقوع پدیده ضربه قوچ وارد نرم‌افزار گردید و شبیه‌سازی در حالت غیرماندگار انجام شد. سرانجام با استفاده از نتایج شبیه‌سازی در حالت غیرماندگار پارامترهای اعتماد-پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری در تمامی نقاط شبکه و تحت سناریوهای مختلف استخراج شد.

منطقه مورد مطالعه

شهر فریدونشهر در غرب استان اصفهان واقع شده است. این شهر دارای عرض جغرافیایی 32 درجه و 56 دقیقه و طول جغرافیایی 50 درجه و 7 دقیقه با ارتفاع 2530 متر از سطح دریا بلندترین شهر ایران است. مدل شبیه‌سازی شده شبکه توزیع آب فریدونشهر دارای 538 گره، 593 لوله، 2 مخزن، 4 تانک، 3 پمپ شناور و 3 شیر فشارشکن هست. لوله‌های مورداستفاده در این شبکه از سه نوع پلی‌اتیلن، آزیست سیمانی و فولادی هست. پس از وارد کردن اطلاعات اولیه به مدل، با استفاده از الگوریتم ژنتیک به واسنجی ضرایب زبری لوله‌ها پرداخته شد. هدف از واسنجی نزدیک نمودن فشارهای اندازه‌گیری شده به فشارهای محاسبه‌شده توسط مدل بود. در شکل 1 شبکه مورد مطالعه و نقاط اندازه‌گیری فشار نشان داده شده است.

با توجه به آنچه که در این بخش گذشت، هدف از انجام پژوهش حاضر وارد کردن پارامترهایی است که بتوان به صورت کمی، کارایی شبکه‌های آبرسانی را ارزیابی نمود. در واقع با استفاده از این پارامترها می‌توان تحلیل بهتری در مورد شرایط شکست و وقوع پدیده ضربه قوچ و مقایسه بین سناریوهای مختلف در شبکه‌های آبرسانی داشت. همچنین به اطلاعات مهمی چون فراوانی وقوع، تداوم و آسیب پدیده ضربه قوچ که کمتر مورد توجه قرار گرفته است در قالب پارامترهای ذکرشده اشاره کرد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق به منظور تحلیل جریان در حالت غیرماندگار و پدیده ضربه قوچ، نرم‌افزار Hammer که یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارها در این زمینه است انتخاب شد. منطقه مورد مطالعه نیز شبکه آبرسانی شهر فریدونشهر اصفهان هست. در ابتدا اطلاعات کلی شبکه شامل اجزا مختلف شبکه‌های آبرسانی مانند لوله‌ها، گره‌ها، مخازن، تانک‌ها، ایستگاه پمپاژ، شیرهای شبکه وارد مدل گردید و شبیه‌سازی در حالت ماندگار صورت گرفت و پس از آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک به فرآیند واسنجی ضرایب زبری لوله‌های شبکه پرداخته شد. سپس شرایط جریان

جدول 1- مقایسه مقادیر محاسباتی با داده‌های واقعی.

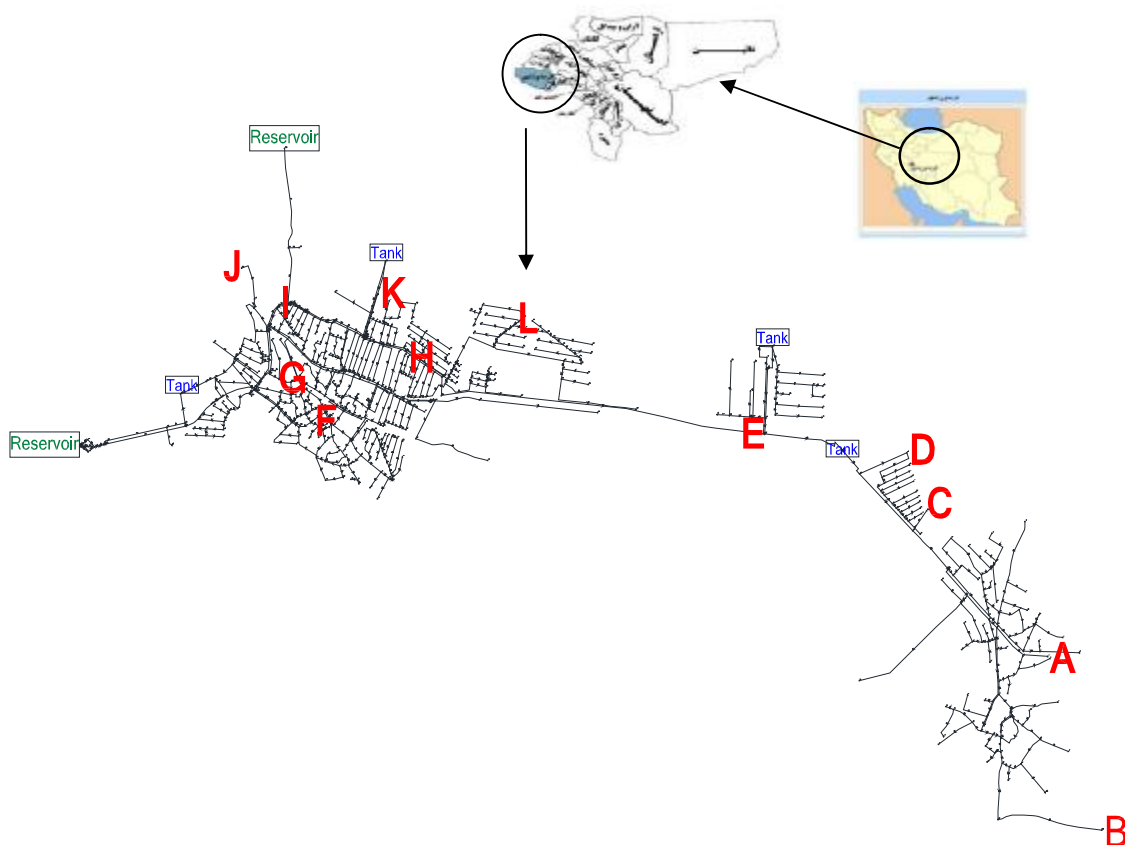
شماره گره	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)	(I)	(J)	(K)	(L)
فشار مشاهده شده (m)	93/6	67/4	42/2	14/9	37/5	103/9	95/9	64/9	64/5	57/2	36/8	21/1
فشار محاسبه شده (m)	92/92	65/85	40/33	15/46	35/98	98/3	91/76	64/8	60/13	56/69	36/82	22/78
اختلاف (m)	-0/68	-1/55	-1/87	0/56	-1/52	-5/6	-4/14	-0/1	-4/37	-0/51	1/02	1/68
درصد اختلاف (%)	0/72	2/3	4/43	3/75	4/05	5/39	4/31	0/15	6/77	0/89	2/77	7/96

پژوهش به دنبال پارامترهایی برای بیان میزان ضعف سیستم در مواقع شکست در قالبی روشن و ساده بوده است. معیار شکست در این پژوهش بیشینه فشار ناشی از ضربه کوچ هست که در لوله‌های مختلف متفاوت هست. در ادامه تعاریف توصیفی و ریاضی از پارامترهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و همچنین ترکیب آن‌ها پایداری ارائه شده است.

در 12 نقطه از شبکه فشار محاسبه شده توسط نرم‌افزار با داده‌های واقعی مقایسه شد و نتایج واسنجی ضرایب زبری لوله‌ها نشان داد بیشترین میزان خطا 7/96 درصد بوده است. در جدول 1 اطلاعات این 12 نقطه نشان داده شده است.

معرفی پارامترهای ارزیابی عملکرد شبکه

وضعیت بهره‌برداری از یک سامانه آبی را می‌توان به دو صورت رضایت‌بخش و نامطلوب توصیف نمود. این



شکل 1- شبکه آبرسانی فریدونشهر.

مقادیر امکان‌پذیر X_t را می‌توان به دو مجموعه رضایت-بخش (S) و مجموعه غیرقابل قبول (F) تقسیم نمود. فرض می‌شود در هر مقطع زمانی t خروجی سامانه یکی از اعضای این مجموعه باشد. در این صورت اعتمادپذیری

اعتمادپذیری

حالت یا وضعیت خروجی یک سامانه را با متغیر تصادفی X_t در مقطع زمانی t در نظر بگیرید، که در آن t دارای مقادیر گسسته 1 و 2 و 3... خواهد بود. به‌طورکلی

در درازمدت زمان باقی‌ماندن در وضعیت غیرقابل قبول یا شکست به مقدار متوسط $\frac{a}{r} - \frac{a}{r} \frac{\partial}{\partial t}$ میل خواهد کرد. عکس این مقدار میانگین نرخ بازیابی و بهبود سامانه است که برگشت‌پذیری نامیده می‌شود (هاشیموتو و همکاران 1982).

$$g = \frac{r}{1-a} = \frac{\text{prob } X_t \hat{=} S, X_{t+1} \hat{=} F}{\text{prob } X_t \hat{=} F} \quad [4]$$

آسیب‌پذیری

آسیب‌پذیری عبارت است از بزرگی محتمل شکستی که احتمال دارد رخ دهد. برای بیان ریاضی از آسیب‌پذیری سامانه، فرض می‌شود که متغیر عملکرد سامانه X_1 می‌تواند مقادیر گسسته X_1, X_2, \dots, X_n را داشته باشد. برای ایجاد یک شاخص کمی از آسیب‌پذیری سامانه به شکست (n) ، به هر متغیر در حالت شکست $X_j \hat{=} F$ یک شاخص عددی متناظر با آن حالت، S_j تخصیص داده می‌شود. علاوه بر این e_j به‌عنوان احتمال اینکه X_t متناظر با S_j نامطلوب‌ترین و شدیدترین خروجی است در نظر گرفته می‌شود. یک معیار مناسب برای بیان آسیب‌پذیری کلی یک سامانه n ، بیشینه شدت مورد انتظار از استقرار یک عضو مجموعه وضعیت نامطلوب آن سامانه خواهد بود (هاشیموتو و همکاران 1982).

$$n = \sum_{j \in F} S_j e_j \quad [5]$$

پایداری

اگر پارامترهای اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری افزایش و آسیب‌پذیری کاهش یابد سامانه موردنظر به‌طور فزاینده‌ای پایدار خواهد شد. شاخص پایداری را می‌توان ترکیب سه پارامتر اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و

یک سامانه را می‌توان با فراوانی و یا احتمال وقوع وضعیت رضایت‌بخش برای آن سامانه با علامت α بیان نمود. در چنین شرایطی:

$$\begin{aligned} a &= \text{prob } X_t \hat{=} S \\ Z_t &= 1 \text{ @ } X_t \hat{=} S \\ Z_t &= 0 \text{ @ } X_t \hat{=} F \end{aligned} \quad [1]$$

آنگاه $\sum_{t=1}^n \frac{a}{n} Z_t$ نسبت زمانی است که در دوره بین $t=1$ و $t=n$ عملکرد سامانه در وضعیت رضایت‌بخش بوده است. در درازمدت این نسبت به احتمال عملکرد رضایت‌بخش سامانه نزدیک شده و بنابراین برابر اعتمادپذیری سامانه خواهد شد (هاشیموتو و همکاران 1982).

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^n \frac{a}{n} Z_t = a \quad [2]$$

برگشت‌پذیری

برگشت‌پذیری به این صورت تعریف شده است که یک سامانه در صورت وقوع شکست چگونه به سرعت قادر به بازیابی وضعیت قبل از شکست خواهد بود. اگر T_F مدت زمان باقی‌ماندن خروجی یک سامانه در وضعیت غیرقابل قبول پس از یک شکست باشد، برگشت‌پذیری برابر عکس مقدار مورد انتظار T_F خواهد بود. اگر W_t نشان‌دهنده تبدیل وضعیت سامانه به حالت غیرقابل قبول باشد، در درازمدت متوسط W_t برابر خواهد شد با احتمال α ، که عملکرد سامانه در یک دوره t عضو مجموعه S و در دوره بعدی آن، عضو مجموعه F باشد:

$$r = \text{prob}\{X_t \hat{=} S \text{ and } X_{t+1} \hat{=} F\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n W_t \quad [3]$$

$$\begin{aligned} W_t &= 1 \text{ if } X_t \hat{=} S \text{ and } X_{t+1} \hat{=} F \\ W_t &= 0 \text{ @ } \text{Otherwise} \end{aligned}$$

تداوم ضربه قوچ و خسارات ناشی از ضربه قوچ در شبکه‌های آبرسانی می‌باشند.

نرم‌افزار Hammer

نرم‌افزار Hammer یک برنامه قدرتمند در تحلیل پدیده ضربه قوچ است که مهندسان را در تحلیل سیستم‌های پمپاژ و شبکه لوله‌ها هنگامی که از یک حالت پایدار به حالت ناپایدار تغییر می‌یابد کمک می‌کند. روش محاسباتی مدل Hammer روش مشخصه‌ها هست که در این روش حل کامل معادلات پیوستگی و مومنتم برای یک سیال نیوتنی با فرض نظریه الاستیک انجام می‌پذیرد. این نظریه بر اساس این حقیقت استوار است که سیال موردنظر تراکم‌پذیر است و دیواره لوله نیز می‌تواند تحت فشارهای زیاد منبسط شود. روابط مورد استفاده این نرم‌افزار عبارت‌اند از:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + r C^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad [7]$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{r} \times \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad [8]$$

و برای هر قطعه لوله:

$$C = \sqrt{\frac{K}{r \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{K D}{E} \frac{\partial \sigma}{\partial x}}} \quad [9]$$

که در آن V : سرعت جریان ماندگار، p : فشار آب، f : ضریب زبری دارسی-وایسباخ، D : قطر لوله، ρ : چگالی سیال، C : سرعت موج فشاری، E : مدول الاستیسیته لوله، K : مدول حجمی سیال، e : ضخامت لوله و t : زمان. تنظیمات خاص این نرم‌افزار شامل تنظیمات مربوط به شرایط پروژه، تنظیمات مربوط به جریان ماندگار و اجرای اولیه، تنظیمات مربوط به شرایط غیرماندگار و در نهایت اجرای نهایی هست. همچنین برای محاسبه جریان

آسیب‌پذیری معرفی کرد. برای این منظور این سه پارامتر باید اعدادی بین 0 و 1 باشند. همچنین به علت اینکه به اعداد کمتر وزن بیشتری اختصاص داده شود از ضرب سه پارامتر قبلی این پارامتر به دست می‌آید:

$$S = a > g > n \quad [6]$$

بنابراین در این تحقیق به منظور استخراج پارامترهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری در نقاط مختلف طبق تعاریف ارائه شده و با توجه به معیار شکست در نظر گرفته شده، فشار در تمامی نقاط در حالت غیرماندگار در طول بازه مورد مطالعه (140 ثانیه) با حد فشار قابل تحمل در نقاط مختلف مقایسه شد. بدین منظور در این تحقیق با توجه به میزان فشار در طول بازه زمانی در نظر گرفته شده، نسبت تعداد مقاطع زمانی که فشار از حد مجاز خارج شده بر کل مقطع زمانی به عنوان پارامتر اعتمادپذیری در یک گره از شبکه تعریف می‌شود. برای محاسبه پارامتر برگشت‌پذیری در یک نقطه، مطابق تعریف ارائه شده با بررسی سری زمانی فشار، تعداد بازگشت‌های گره از حالت شکست به حالت بدون شکست تقسیم بر کل مقطع زمانی که شکست اتفاق افتاده، به عنوان پارامتر برگشت‌پذیری بیان می‌شود. در مورد آسیب‌پذیری در هر گره ابتدا در کل مقطع زمانی فشارهای بیش از حد مجاز در آن گره را به صورت نزولی مرتب کرده و متناسب با مرتبه هر یک، احتمال وقوع (e_i) هر کدام محاسبه (احتمال ویبول) می‌شود. پس از آن حاصل ضرب فشار در احتمال مربوطه محاسبه شده و در نهایت این مقادیر با هم جمع می‌گردد و به صورت نسبی گشته و از عدد 1 کم می‌شود. در نهایت نیز پارامتر پایداری از ضرب سه پارامتر ذکر شده به دست آمده می‌آید. در واقع پارامترهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری به ترتیب بیان‌گر فراوانی وقوع ضربه قوچ،

شبکه است. این امر باعث بروز حوادث و تلفات بالای شبکه می‌شود. در مورد سرعت نیز در لوله‌های با قطر بیش از 100 میلی‌متر، نتایج نشان داد در 85 درصد لوله‌ها سرعت کمتر از 0/3 متر بر ثانیه، در 12 درصد بین 0/3 تا 2 متر بر ثانیه و در 3 درصد موارد، بیش از 2 متر بر ثانیه هست. نکته قابل‌توجه این است که سرعت‌های بیش از 2 متر بر ثانیه در خطوط اصلی وجود دارد که نشان‌دهنده کم بودن قطر این لوله‌ها نسبت به دبی عبوری و بالا بودن میزان افت در خطوط اصلی شبکه می‌باشد.

حالت غیرماندگار

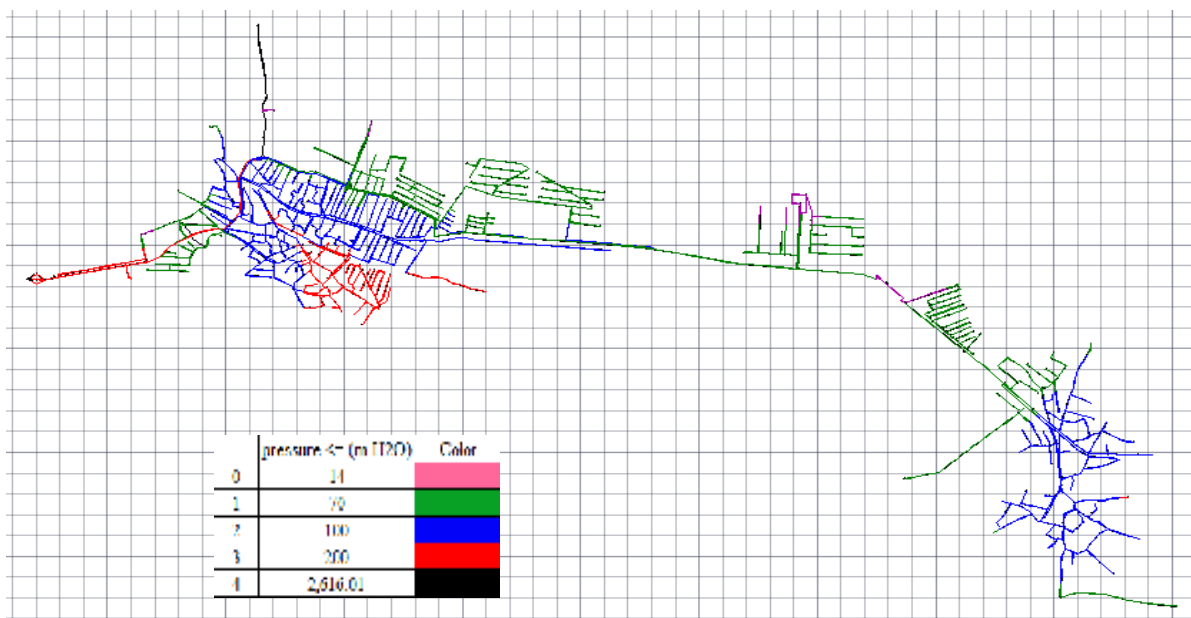
در این حالت قطع ناگهانی پمپ‌ها به‌عنوان عامل غیرماندگاری در نظر گرفته شد. در شکل 2 به‌صورت گرافیکی میزان فشار در کل نقاط شبکه در شرایط غیرماندگار نشان داده شده است.

غیرماندگار بایستی به خاطر داشت که در این جریان در مقایسه با جریان ماندگار افت و اصطکاک جریان حین بروز شرایط هیدرولیکی میرا افزایش می‌یابد. زیرا تغییرات ناگهانی در فشارهای میرا باعث افزایش شکاف و برش گردابی می‌شود. بنابراین اصطکاک جریان میرا برای هر گام زمانی بایستی محاسبه شود. لذا در بخش مربوطه در نرم‌افزار نوع بازه اجرا، گام‌های زمانی و تعداد گام‌های زمانی انتخاب می‌شود (نظری و رضایی 1393).

نتایج و بحث

حالت ماندگار

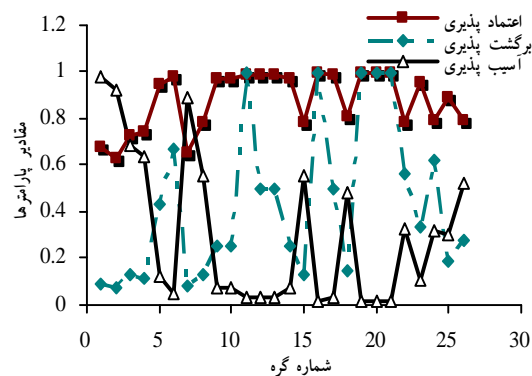
در شبکه مورد مطالعه اختلاف ارتفاع حدود 200 متر بین پایین‌ترین و بالاترین نقطه شبکه وجود دارد. نتایج نشان داد بیشتر نقاط شبکه دارای فشار بیش از 70 متر می‌باشند که نشان‌دهنده ناحیه‌بندی نامناسب این



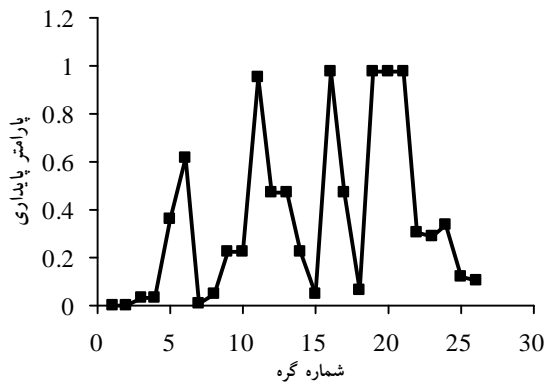
شکل 2- نمایش گرافیکی فشار در حالت غیرماندگار.

پایداری کمتر از 1 هست (26 نقطه) محاسبات نشان داده شده است. در شکل 3 ضرایب اعتمادپذیری، برگشت-پذیری و آسیب‌پذیری و در شکل 4 ضریب پایداری در حالت وقوع ضربه قوچ نشان داده شده است. سپس با استفاده از این ضرایب تأثیر حالت‌های مختلف بر روی پدیده ضربه قوچ مورد بررسی قرار گرفت.

جهت به دست آوردن ضرایب اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری میزان افزایش فشار از حد مجاز به عنوان معیار شکست در نظر گرفته شد. در ابتدا این ضرایب برای حالت وقوع پدیده ضربه قوچ در شبکه مورد مطالعه محاسبه شد. با توجه به تعداد زیاد نقاط شبکه فقط در نقاطی از شبکه که ضریب



شکل 3- ضرایب اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری در حالت وقوع ضربه قوچ.



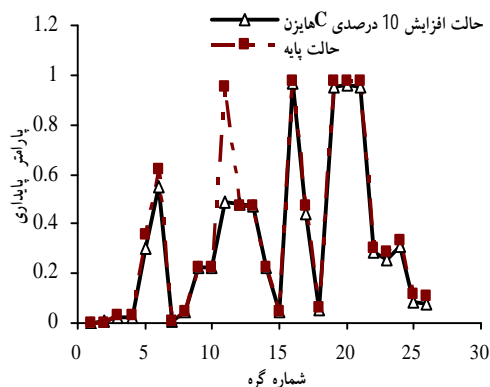
شکل 4- ضریب پایداری در حالت وقوع ضربه قوچ.

تجاوز کرده بیشترین مقدار بوده است. در گره‌های 16 و 19 ضریب اعتمادپذیری با مقدار 0/99 بیشترین بوده است که در این نقاط خطر ناشی از ضربه قوچ کمتر بوده است. در مورد برگشت‌پذیری در نقاطی که مقدار آن 1 هست به این معناست که در این نقاط پس از هر بار

همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود، کمترین میزان ضریب اعتمادپذیری با مقدار 0/63 در گره شماره 2 رخ داده است؛ در واقع در این گره فراوانی وقوع ضربه قوچ در بازه زمانی مورد مطالعه (140 ثانیه) بیشترین میزان بوده و تعداد گام‌های زمانی که فشار از حد مجاز

ضریب پایداری 1 هست در اثر پدیده ضربه قوچ در 26 نقطه از شبکه مقدار ضریب پایداری کمتر از 1 می‌شود. در واقع ضریب پایداری را می‌توان نتیجه سه ضریب قبلی دانست. به این صورت که هر چه مقدار اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری افزایش و آسیب‌پذیری کاهش یابد مقدار ضریب پایداری افزایش می‌یابد (لوکس 1997). این ضریب از این جهت اهمیت دارد که می‌توان به‌طور هم‌زمان در مورد سه ضریب قبلی قضاوت کرد. بنابراین هر چه این ضریب کمتر باشد در آن نقاط باید اقدامات حفاظتی بیشتری صورت گیرد. با توجه به شکل در گره شماره 1 کمترین ضریب پایداری رخ می‌دهد.

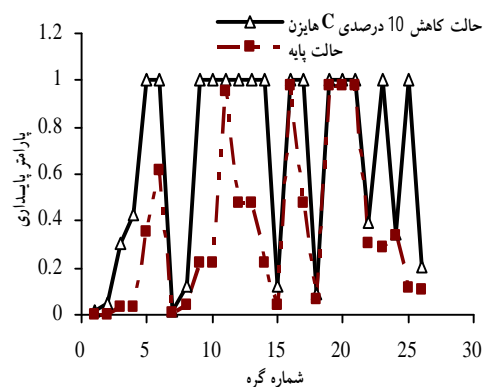
در شکل‌های 5 تا 8 مقدار پارامتر پایداری در 4 حالت مختلف در مقایسه با حالت اولیه و پایه وقوع ضربه قوچ، در گره‌های مختلف نشان داده شده است.



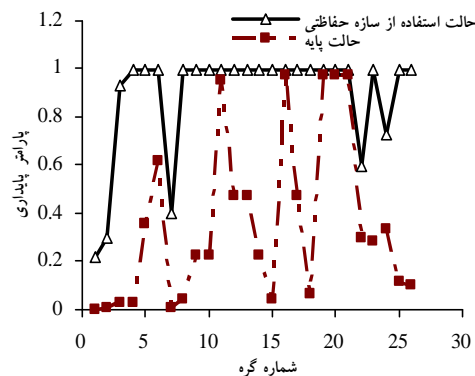
شکل 6- ضریب پایداری در اثر افزایش 10 درصدی C هایزن.

افزایش فشار از حد مجاز به‌سرعت خود را به حالت رضایت‌بخش منتقل کرده و در نقاطی که مقدار آن کم هست نشان‌دهنده این است که در این نقاط ضربه قوچ تداوم بیشتری داشته است. در واقع در این نقاط فشار در وضعیت نامطلوب دوام بیشتری داشته است. در مواقعی که فشار از حد مجاز تجاوز می‌کند ضریب آسیب‌پذیری به‌صورت کمی میزان خسارت را برآورد می‌کند برای مثال دو گره 24 و 26 را در نظر بگیرید مقدار ضریب اعتمادپذیری هر دو گره برابر 0/79 هست؛ ولی، ضریب آسیب‌پذیری به‌ترتیب 0/32 و 0/52 است. بنابراین با توجه به اینکه سطح خطرپذیری هر دو برابر بوده ولی میزان خسارت گره 26 بیشتر است. لذا ضریب آسیب‌پذیری به‌صورت کمی میزان خسارت ناشی از ضربه قوچ را نمایش می‌دهد.

شکل 4 مقدار ضریب پایداری بر اثر پدیده ضربه قوچ را نشان می‌دهد. در حالت ماندگار در کل نقاط شبکه



شکل 5- ضریب پایداری در اثر کاهش 10 درصدی C هایزن.

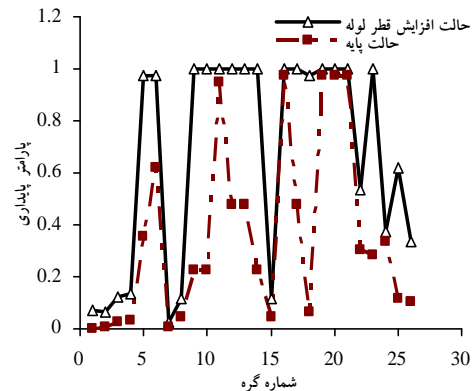


شکل 8- ضریب پایداری در اثر استفاده از سازه حفاظتی.

پایداری داشته و باعث افزایش کارایی شبکه تحت وقوع پدیده ضربه قوچ شده است (حسن‌زاده و همکاران 1382).

نتیجه‌گیری کلی

با کاربرد پارامترهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری که پیش‌ازین در سامانه‌های منابع آب مورد استفاده قرار گرفته می‌توان به صورت کمی کارایی شبکه‌ها را ارزیابی کرد و در مورد خسارات ناشی از وقوع ضربه قوچ در شبکه‌های آبرسانی بحث نمود. در کل در بیشتر نقاط با توجه به ماهیت پدیده ضربه قوچ هر چه میزان اعتمادپذیری کمتر شود میزان آسیب‌پذیری افزایش پیدا می‌کند. در واقع هر چه سطح خطرپذیری افزایش یابد به تبع آن میزان خسارات ناشی از پدیده ضربه قوچ بیشتر می‌شود. در میان این پارامترها، ضریب پایداری با توجه به در نظر گرفتن سه ضریب قبلی از اهمیت بیشتری برخوردار است. در واقع پارامتر پایداری به دلیل اینکه می‌تواند در تبیین عملکرد شبکه مقیاسی ارائه کند که هم‌زمان بتوان در مورد سه پارامتر دیگر قضاوت کرد دارای اهمیت است. به‌طورکلی می‌توان گفت که هرچه پارامتر پایداری بیشتر شود کارایی شبکه نیز افزایش می‌یابد. بنابراین هر چه اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری افزایش و آسیب‌پذیری کاهش یابد کارایی شبکه نیز بهبود می‌یابد.



شکل 7- ضریب پایداری در اثر افزایش قطر لوله.

در شکل 5 تأثیر کاهش 10 درصدی C هایزن بر روی ضریب پایداری در حالت وقوع جریان غیرماندگار (پدیده ضربه قوچ) در مقایسه با حالت اولیه و وقوع ضربه قوچ موردبررسی قرار گرفت. همان‌طور در شکل 5 مشاهده می‌شود نتایج نشان داد که کاهش C هایزن باعث افزایش ضریب پایداری در تمام نقاط شده است. در شکل 6 تأثیر افزایش 10 درصدی ضریب C هایزن بر روی پدیده ضربه قوچ را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که افزایش 10 درصدی ضریب هایزن باعث کاهش ضریب پایداری شده است البته تأثیر آن کمتر از کاهش مقدار ضریب هایزن بوده است. شکل 7 تأثیر افزایش یک شماره‌ای در قطر لوله‌ها با توجه به اندازه‌های موجود در بازار بر روی ضربه قوچ را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد افزایش قطر لوله باعث افزایش ضریب پایداری شده و تأثیر افزایش قطر کمی بیشتر از کاهش 10 درصدی ضریب C هایزن بوده است. در شکل 8 تانک هیدروپنئوماتیک با حجم کل 2000 لیتر و حجم مایع 1200 لیتر به‌عنوان سازه حفاظتی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که سازه حفاظتی باعث افزایش ضریب پایداری شده و در بیشتر نقاط مقدار ضریب پایداری به 1 می‌رسد. در میان سناریوهای بررسی‌شده سازه حفاظتی (تانک هیدروپنئوماتیک) بیشترین تأثیر را بر روی ضریب

منابع مورد استفاده

- احتشام منش ج، 1389. راهنمای نرم‌افزار Hammer، انتشارات آیدین، تهران.
- حسن زاده ی، زمانیان ج و ابریشمی ج، 1382. بررسی روش‌های کنترل فشارهای ماکزیمم و مینیمم ناشی از پدیده ضربه قوچ در ایستگاه پمپاژ فشار قوی. صفحه‌های 609 تا 621. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
- نجمائی م، 1369. ضربه قوچ. انتشارات هما، تهران
- نظری پ و رضایی ح، 1393. ارزیابی کارایی نرم‌افزارهای Hammer، Hytran و روش حل معادله ژاکوفسکی برای تحلیل ضربه قوچ در ایستگاه پمپاژ سد حسنلو. نشریه دانش آب و خاک، جلد 24، شماره 1، صفحه‌های 131 تا 142.
- Batterton SH, 2006. Water Hammer: An Analysis of Plumbing Systems, Intrusion, and Pump Operation. State University and Virginia Polytechnic.
- Bentes I, Afonso L, Varum H, Pinto J, Varajao J, Duarte A and Agarwal J, 2011. A new tool to assess water pipe networks vulnerability and robustness. *Engineering Failure Analysis* 18: 1637-1644.
- Chaudhry MH, 1987. *Applied Hydraulic Transients*. 2nd ed, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Creaco E, Fortunato A, Franchini M and Mazzola MR, 2014. Comparison between entropy and resilience as indirect measures of reliability in the framework of water distribution network design. *Procedia Engineering* 70: 379-388.
- Fontana N, Giugni M and Portolano D, 2012. Losses reduction and energy production in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 138: 237-245.
- Hashimoto T, Stedinger JR and Loucks DP, 1982. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* 18: 14-20.
- Jung B and Karney W, 2006. Hydraulic optimization of transient protection devices using GA and PSO approaches. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 132(1): 44-52.
- Karamouz M, Saadati S and Ahmadi A, 2010. Vulnerability Assessment and Risk Reduction of Water Supply Systems. Pp. 4414-4426. World Environmental and Water Resources Congress. 16-20 May, United State.
- Kwon HJ, 2007. Analysis of transient flow in a piping system. *Journal of Civil Engineering KSCE* 11: 209-214.
- Loucks DP, 1997. Quantifying trend in system sustainability. *Hydrological science Journal* 42: 513-530.
- Piratla KR, Fisher E, Andrus RD, Simonson LA and Farahmandfar Z, 2014. Evaluating the Resiliency of the Water System in Charleston, South Carolina against Liquefaction Hazard Through the use of Seismic Hazard Maps. Pp. 1217-1228. Proceeding of the Pipeline Conference. 3-6 August, United State.
- Sun SA, Djordjević S and Khu ST, 2011. A general framework for flood risk-based storm sewer network design, *Urban Water Journal* 8: 13-27.
- Wu Y, Xu Y and Wei W, 2011. Water hammer analysis of district Networks. Pp. 492-501. 3th International Conference on Pipelines and Trenchless Technology. 26-29 October, China.