

دراسة تحسين الموثوقية لشبكة الإمداد بمياه الشرب لمدينة جبلة باستخدام GANetXL

د. هناء سلمان*
د. فيروز شكور**
د. عادل عوض***
فاطمة سلمان****

(تاريخ الإيداع 26 / 6 / 2021. قُبل للنشر في 4 / 10 / 2021)

□ ملخص □

تكمّن أهمية موثوقية شبكة الإمداد بمياه الشرب في قدرة النظام على توفير الاحتياج المطلوب بضغط كافٍ في الظروف العادية والحرّجة. تم في هذا البحث تقييم معاملات الموثوقية لشبكة الإمداد بمياه الشرب لمدينة جبلة وهي (مؤشر المرونة (Ir) ، ومؤشر المرونة المعدل (MRI) ، ومؤشر فائض الضاغط الأدنى (Im)). ولتحسين أداء هذه الشبكة تم استخدام GANetXL (وهو برنامج يعتمد الخوارزمية الجينية في عمليات البحث الأمثلي، ويمكن ربطه ببرنامج EPANET)، وذلك باستخدام توابع أحادية الهدف ومتعددة الأهداف، عندما لا يكون الهدف تقليل الكلفة فقط وإنما زيادة الموثوقية أيضاً. وباستخدام نتائج التحليل الإحصائي تم تحديد الأنابيب الحساسة الأكثر احتمالية للفشل. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها ضعف أداء مؤشر مرونة الشبكة عند مقارنته بالمؤشرات الأخرى تحت ظروف فشل الأنابيب، خاصة في الشبكات المنفذة ذات الأقطار الصغيرة. كما تبين أنه في حال تم تحسين شبكة توزيع المياه فقط من حيث الكلفة فسيكون هناك انخفاض كبير في ضاغط بعض العقد عند فشل الأنابيب الموصولة بها. وتبين أنه من الممكن تقليل معدل الانقطاع عن طريق الصيانة المسبقة لمكونات النظام، ويمكن أيضاً تحسين الموثوقية عن طريق تحويل الشبكة المتفرعة إلى حلّية. ووجدنا أيضاً أن التحسين متعدد الأهداف يعطي نتائج أفضل من التحسين بهدف وحيد، وأن العلاقة بين الموثوقية والكلفة غير مباشرة، ولكن الموثوقية تزداد بانخفاض معدل كسر الأنابيب.

الكلمات المفتاحية: شبكات الإمداد مياه الشرب، الكلفة الدنيا، معدل الكسر، أمثلة، الخوارزمية الجينية.

* أستاذ مساعد قسم الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

HANASALMAN@TISHREEN.EDU.SY

** مدرسة - قسم الذكاء الصناعي - كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. feirozch@yahoo.com

*** أستاذ - قسم الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

ADELAWAD@TISHREEN.EDU.SY

**** طالبة دكتوراه - قسم الهندسة البيئية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Email: fatmaslman88@gmail.com

Study Improve Reliability for Water Distribution Networks in Jableh City Using GANetXL

Dr. Hana Salman*
Dr. Feroze Shakor**
Dr. Adel awed***
Fatima Salman****

(Received 26 / 6 / 2021. Accepted 4 / 10 / 2021)

□ ABSTRACT □

The importance of water distribution network reliability lies in the ability of the system to supply the required need with sufficient pressure at normal and abnormal conditions.

In this research, reliability indicators of water distribution networks for Jableh city (**Resilience Index (*Ir*)**, **Modified Resilience Index (*MRI*)**, **Minimum Surplus Head Index (*Im*)**). In order to improve the performance of this network, was used GANetXL (GANetXL is an optimization tool in Excel environment and works based on Genetic Algorithm. We can link with EPANET), to do one-objective and multi-objective optimization of the water distribution network. When the function not only reduced cost but also maximize the reliability indicators. Moreover, the results of a statistical analysis for each pipe in use to determine the sensitive pipes, that are of the most failure probability.

The obtained results showed poor performance of the network resilience index when compared with other indicators under pipe failure conditions, especially in the networks implemented with small diameters. It was also found that if the water distribution network were only optimized in terms of cost, there would be an unacceptable pressure drop at some nodes in case of pipe failure. In addition, it has been found that it is possible to reduce the outage rate by prior maintenance of system components, and reliability can also be improved by turned tree to loop network. We also found that multi-objective optimization yields better results than single-target optimization, and the relationship between reliability and cost is indirect, but reliability increases with decreasing pipe breakage rate.

Keywords: Water Distribution Networks, Lowest Cost, Breakage Rate, Optimization, Genetic Algorithm

* Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. HANASALMAN@TISHREEN.EDU.SY

** Assistant Professor, Department of Artificial Intelligence, Faculty of Information Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. feirozch@yahoo.com

***Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. ADELAWAD@TISHREEN.EDU.SY.

**** Postgraduate Student - Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. Email: fatmaslman88@gmail.com

مقدمة:

تعد أنظمة الإمداد بمياه الشرب واحدة من البنى التحتية الأساسية والضرورية للمجتمع، حيث يتم العمل على تطوير أنظمة جديدة باستمرار تعكس النمو السكاني، وأيضاً العمل على تحسين الأنظمة الحالية وتوسيعها، نظراً لارتفاع الطلب على المياه. يعد التصميم الاقتصادي لأنظمة الإمداد المياه مهمة معقدة، لأنها تشمل حل عدد كبير من المعادلات غير الخطية، مع الأخذ بعين الاعتبار السعي لتحسين الحجوم وحالات استثمار عناصر الشبكة مثل الأنابيب والمضخات والخزانات والصمامات. تصبح هذه المهمة أكثر تعقيداً عندما تشمل مشكلة التحسين (الأمثلة) عدداً كبيراً من متطلبات النظام الخاضع للتصميم (على سبيل المثال جودة المياه)، وأهدافاً إضافية إلى جانب الحل الاقتصادي الأقل تكلفة (على سبيل المثال الضرر المحتمل للحرثائق) متضمنة المزيد من جوانب الحياة الواقعية (مثل عدم الموثوقية). وهنا تبرز أهمية استخدام طرائق البحث الأمثلي ذات الأهداف المتعددة، التي تسمح للمستخدم بالمفاضلة بين أهداف مختلفة للوصول إلى مجموعة من الحلول المثالية الجزئية ضمن فضاء الحلول، الأمر الذي يعتبر أكثر واقعية في المشاريع الهندسية، وبشكل خاص شبكات الإمداد مياه الشرب موضوع هذا البحث.

تحدد الموثوقية في شبكات الإمداد مياه الشرب بنوعين من حالات الفشل، وهي الفشل الميكانيكي لعناصر النظام، والفشل الهيدروليكي الناتج عن تغيرات الطلب على المياه وارتفاع الضغوط. وتعتبر الموثوقية مقياس غير مباشر لرضا المستهلك حول أداء شبكة الإمداد بالمياه، حيث تركز الأبحاث في الوقت الحالي على أداء النظام ككل؛ توزع الصمامات، متطلبات الضغوط والاحتياج، أكثر من أداء النظام بشكل عام في حالات الفشل لأي عنصر من العناصر. عرفت الموثوقية حسب الباحث Kaufmann بأنها احتمالية قيام النظام بأداء المهمات المطلوبة منه تحت شروط محددة خلال فترة زمنية محددة [1]. كما عرف Cullinane الموثوقية بأنها قدرة النظام على تأمين الخدمات ضمن مستوى مقبول من الانقطاع بسبب الحالات الطارئة [2]. أما Goulter فقد بين أن الموثوقية هي قدرة النظام على تحقيق المطلوب من خلال توفير كميات التدفق ضمن مجال محدد للضغط [3]. وعرف Al-Zahrani الموثوقية على أنها قدرة الشبكة على توفير المياه للمستخدمين بالحدود المطلوبة والجودة المناسبة ضمن الضغط المسموح [4]. ويمكن التمييز بين الموثوقية الهيدروليكية التي تصف أداء النظام لتحقيق متطلبات التدفق المطلوبة وبين موثوقية العناصر التي تحدد احتمالية عدم تعرض العنصر للأعطال خلال فترة حياته. أما الموثوقية الميكانيكية فتقوم على قياس أثر فشل العناصر على أداء النظام، حيث تعتمد الموثوقية الميكانيكية على الموثوقية الهيدروليكية وموثوقية العناصر معاً.

قام الباحثون بتطوير العديد من التقنيات لقياس موثوقية شبكات الإمداد بمياه الشرب. بعضها كانت ناجحة وفعالة والأخرى قليلة الفعالية. قسم Ostfeld هذه التقنيات إلى ثلاثة أصناف رئيسية هي التحليلية (analytical) والتي تعتمد على معالجة تصميم شبكة الإمداد المياه، حيث يرتبط هذا التصميم مع احتمالية بقاء تلك الشبكة متصلة فيزيائياً، ومن الخوارزميات المعتمدة في هذه الطريقة خوارزمية نقطة القطع الصغرى Minimum Cut Set [5]. وحدد الصنف الثاني بالهيدروليكية (hydraulic) والتي تتعلق بشكل رئيسي بالموثوقية الهيدروليكية والتوافر، لذلك تحل هذه الطريقة الأداء الهيدروليكي للشبكة مثل كميات التدفق المطلوبة، والتدفقات التي يتم تحقيقها تحت قيم ضغط محددة إلى مواقع معينة ضمن الشبكة خلال فترة زمنية افتراضية، تركز هذه الطريقة بشكل كبير على النماذج الهيدروليكية، وتتطلب معرفة واقعية في تصميم الشبكة وأدائها بما في ذلك سجلات الفشل [6]، وأخيراً الصنف الثالث هو درجة الاضطراب

(entropy) والتي لا تقوم بدراسة موثوقية الشبكة بصورة مباشرة، وإنما يتم الاعتماد فيها على معايير أخرى مثل القدرة والطاقة، والتان ترتبطان بعلاقة قوية مع الموثوقية [7].

موثوقية العناصر هي احتمالية عدم تعرض العنصر للفشل ضمن فترة زمنية تبدأ باللحظة 0 وتنتهي بالزمن T [11]، تصف هذه الطريقة بصورة واضحة العناصر غير الموثوقة والتي يجب استبدالها في حين الفشل، ولكن تعتبر العناصر في شبكات المياه ذات موثوقية عالية، وبالتالي تدرس الموثوقية على أنها توافر العنصر، حيث التوافرية A هي نسبة الزمن التي يكون فيه العنصر في وضعية العمل، في حين يعتبر العنصر غير متوافر U عندما يكون معطلاً أو في وضعية الإصلاح.

تعد نماذج فشل الأنابيب نماذج إحصائية، وتعتمد على البيانات التاريخية لاستنباط نموذج الفشل الخاص بها، ومن ثم التنبؤ باحتمالية الفشل المستقبلية للأنابيب. وتصنف هذه النماذج الإحصائية ضمن مجموعتين:

النماذج التحديدية: يتم تطوير هذه النماذج من البيانات التاريخية لفشل الانبوب، بهدف التنبؤ بمعدلات الفشل المستقبلية، فقد قدم Kleiner et al نموذجاً أسياً متعدد التباين، والذي يمكن أن يستخدم مع الانابيب ذات الخصائص المتباينة، الأمر الذي يمكن أن يؤثر على أدائها لاحقاً [8]. وقام Parvizsedghy et al بتطوير نموذج لمراقبة أعطال خطوط الأنابيب، والذي يقسم إلى أعطال فيزيائية خاصة بالوسط المحيط، وأخرى تشغيلية، وأوضح النموذج أن عمر الانبوب يعتبر مرجعاً للتنبؤ بمعدلات الأعطال الخاصة به [9].

النماذج الاحتمالية: تعتمد هذه المجموعة على نماذج إحصائية سابقة للتنبؤ باحتمالية تعرض الانابيب للأعطال مستقبلاً، حيث قدم Cox صيغة عامة لنموذج التنبؤ، والتي يمكن لها أن تتوقع الزمن حتى وقوع العطل التالي [10]، في حين قام Kleiner et al بتطوير تطبيق I-WARP (Individual Water m Ain Renewal Planner) والذي يعتبر أداة لتحليل سجلات الفشل لنماذج الكسر لخطوط الأنابيب المستقلة، تعتمد هذه البرمجية على اقتراح أن الكسور في الانابيب المنفصلة تحدث بشكل مستقل عن تابع بواسون [11]. وكذلك طور Scheidegger et al نموذجاً يعتمد على اقتراح أن الزمن لحالة الفشل الأولى يتم نمذجته وفقاً لنموذج توزيع ويبل، في حين يتم نمذجة باقي حالات الفشل اعتماداً على التوزيع الأسّي، إلا أن هذه الطريقة تعطي نموذج فشل غير مستقر، لا يمكنه عرض حالات التآكل خلال الزمن [12].

أهمية البحث وأهدافه:

تسبب الأعطال في شبكات الإمداد بمياه الشرب خسائر اقتصادية كبيرة ناتجة عن إصلاح الأنابيب أو انخفاض الضغوط أو انقطاع تغذية المياه ضمن قطاعات جزئية في شبكة الإمداد، الأمر الذي قد يعود بالضرر الكبير على المواقع الحساسة مثل المراكز الصناعية والابنية الحكومية والمشافي... الخ إضافة للخسارة الاقتصادية.

تكمن أهمية البحث في ضرورة التحقق من موثوقية شبكات الإمداد بمياه الشرب والتي تمثل قدرة النظام على توفير الاحتياج المطلوب بضغط كافٍ في الظروف العادية والحرجة، وهي أحد الأهداف الهامة في التصميم أو في إعادة التأهيل للشبكات الموجودة، وذلك باستخدام طرائق البحث الأمثلي في ظل تطور الحواسيب والبرمجيات وسهولة التعاطي مع المسائل المعقدة متعددة الحلول.

تهدف هذه الدراسة إلى حساب الموثوقية لشبكة الإمداد بمياه الشرب لمدينة جبلة بوضعها الحالي، وحساب موثوقيتها بعد تحويلها لمغلقة، ثم حساب الموثوقية للحلول الناتجة عن أمثلة الحل الهيدروليكي بالكلفة الأقل باستخدام الخوارزمية

الجبينية، والمقارنة بين معاملات الموثوقية المختلفة، بالإضافة إلى دراسة إحصائية لأعطال هذه الشبكة على مدى ثلاثة أعوام وتأثيرها على الموثوقية.

طرائق البحث ومواده:

يصف هذا البحث المنهجية المعتمدة لحساب مؤشرات الموثوقية لشبكة مياه الشرب لمدينة جبلة، تم في البداية استنتاج النموذج الهيدروليكي للشبكة باستخدام EPANET، وتحديد المعايير الخاصة بعمل هذه الشبكة من ناحية التدفق والضغط المطلوب، لتحقيق الحدود المثالية لعمل الشبكة. حيث تم الاعتماد في نمذجة الموثوقية على مجموعة معاملات وهي (Modified Resilience Index (MRI)، (Resilience Index (Ir)، Minimum Surplus، (Head Index (Im))، وتم حسابها أيضاً اعتماداً على معدلات الكسر لأسباب مختلفة خلال ثلاث سنوات، حيث تم تقسيم الشبكة إلى قطاعات يتم معالجة كل قطاع منها بصورة مستقلة، ويتألف كل قطاع من مجموعة أنابيب.

a. حالة الدراسة:

مدينة جبلة: هي مركز منطقة جبلة في محافظة اللاذقية في شمال غرب سوريا. تطل المدينة على البحر المتوسط، وتبعد مسافة 25 كم جنوب اللاذقية. ومعدل سقوط الأمطار فيها (825mm. year).

✓ التعداد السكاني لمنطقة البحث:

بسبب الظروف الراهنة لم يتم تعداد السكان من قبل مديرية الإحصاء المركزي بعد عام 2004 م، فتم الاعتماد على أعداد السكان الموجودة لدى بلدية جبلة والمعتمدة لدى مختبر الأحياء السكنية وبلغ 75500 نسمة.

✓ مصدر التغذية الرئيسي:

نهر السن: يعد نهر السن أغزر أنهار المنطقة الساحلية، حيث تتراوح غزارته بين (12-22 m³/sec)، تصل غزارته الدنيا صيفاً إلى (5.5 m³/sec) بينما ترتفع لتصل إلى (27m³/sec) شتاءً، لا يتجاوز طول نهر السن (6km) تبدأ من بحيرة السن وتنتهي عند قرية عرب الملك، عند المصب على البحر المتوسط جنوب مدينة جبلة.

✓ مصادر مياه مدينة جبلة:

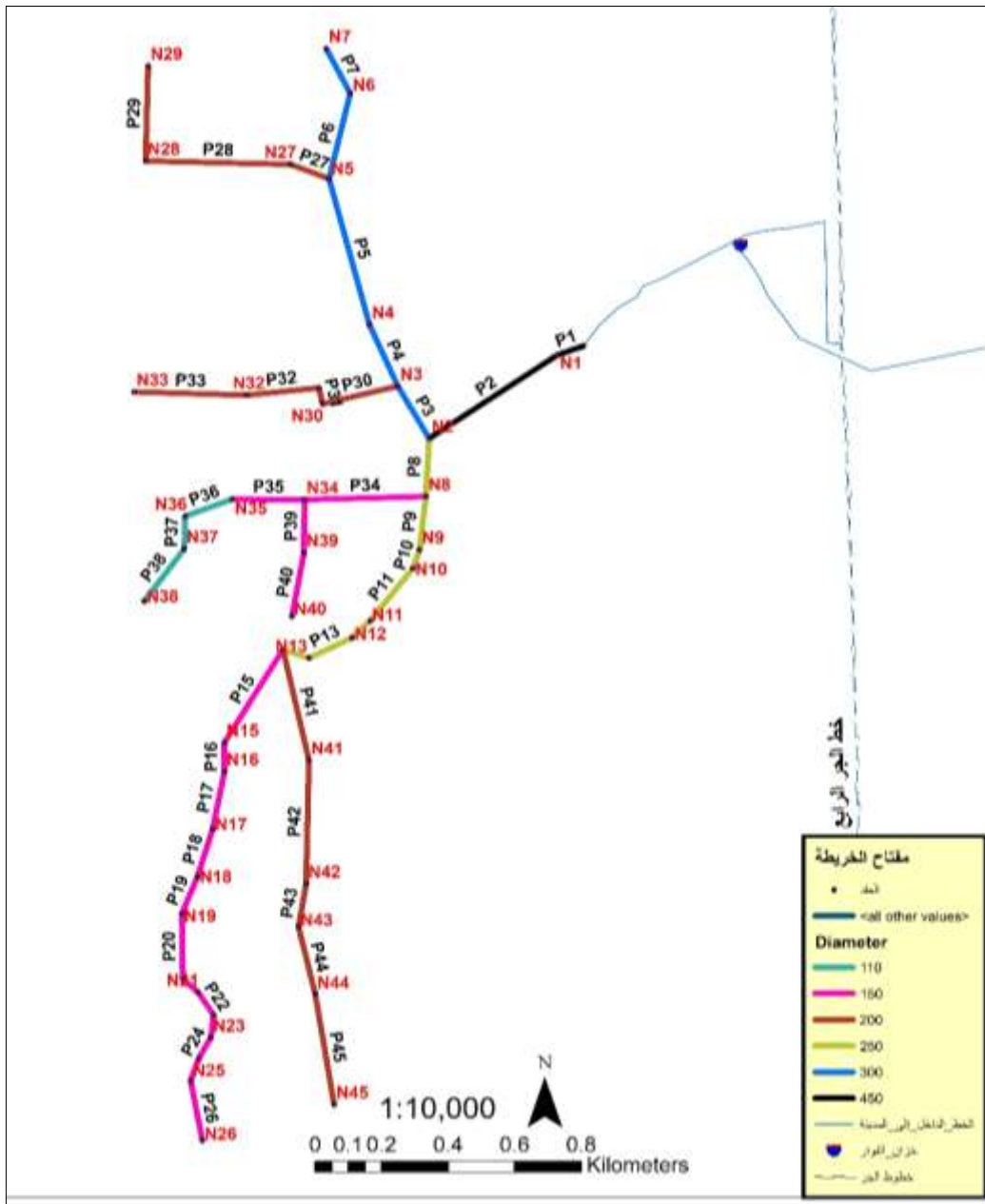
من خطوط الجر الممتدة من خزانات قرفيص وحتى مدينة اللاذقية ومن آبار الفوار:

▪ خط الجر الأول من الفونت المرن بقطر 700mm ممتد من خزان بحجم (1000m³) على منسوب 90m بطول 14 k.m.

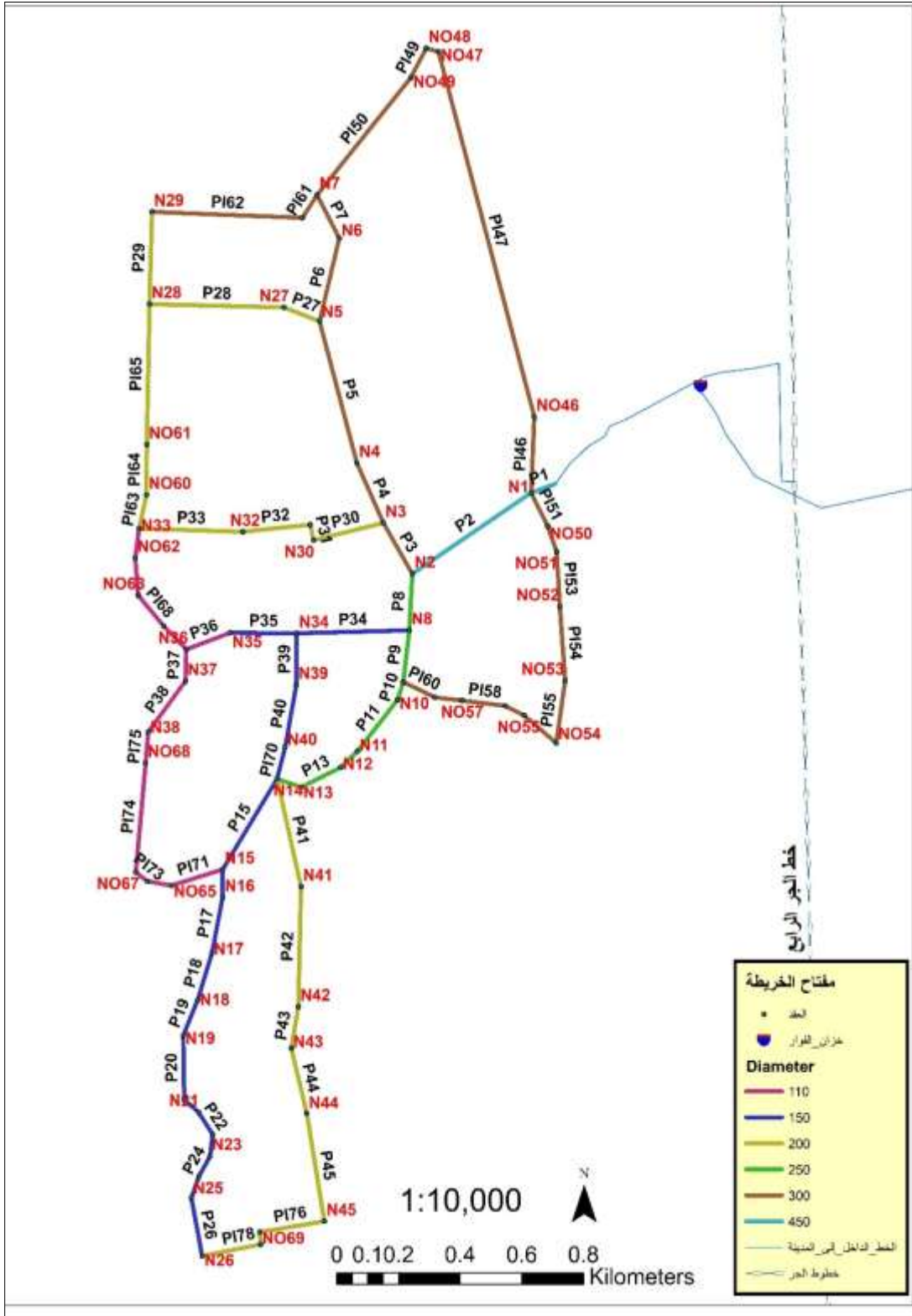
▪ خط الجر الرابع من الفونت المرن بقطر 1000mm ممتد من خزان بحجم (1500m³) على منسوب 90 m بطول 13 k.m.

بالإضافة إلى آبار نبع الفوار بغزارته حوالي (3000m³ /d) يتم ضخها إلى خزان الفوار وتغذي الخط الرئيسي لجبلة في آخر عام 2019. يتم وصل مصادر المياه جميعها إلى الخط الداخل للمدينة بقطر (450 mm).

والشكل (1) يوضح شبكة مياه الشرب لمدينة جبلة الحالية بعد هيكلتها لتحويلها إلى نموذج هيدروليكي باستخدام عدد من البرامج (GIS، WaterGEMS، Epanet، Google Earth). تتألف الشبكة الحالية الرئيسية من 45 أنبوب و45 عقدة. تم تحويل الشبكة إلى شبكة مغلقة بوصول نهايات الشبكة المتفرعة ببعضها للقضاء على الفاقد والضيعات وفق ما هو موضح بالشكل (2) حيث أصبحت تتألف من 78 أنبوب و70 عقدة.



الشكل (1) شبكة مياه الشرب لمدينة جبلة الحالية



الشكل (2) شبكة الإمداد بمياه الشرب لمدينة جبلة بعد تحويلها لمغلقة

.b. GANetXL:

تستخدم GANetXL كأحد الإضافات البرمجية على برنامج Excel لدعم الحلول الجينية لطيف واسع من المجالات العلمية، تم تطويرها من قبل Center for Water System of University لتتكامل مع برنامج Excel وفقاً لواجهاته التقليدية لحل القضايا وحيدة أو متعددة الأهداف. الميزة الأساسية لإضافة GANetXL تكاملها السهل مع EPANET عبر Visual Basic وتقوم بمهام تحقيق الأمثلية لهدف وحيد ومتعدد الأهداف، كما تتمتع بالقدرة على إضافة الشروط الجزائية [13].

تسمح هذه الخوارزمية بتحديد الخصائص الجينية الأساسية مثل التعداد السكاني (الممثل لعدد الانابيب) وعدد الأجيال وطريقة الاختيار للجيل الأفضل وطرق التقاطع بين جينات الأجيال والطفرات. تعتبر الخوارزمية الجينية مثالية ضمن مجال شبكات الإمداد المياه. وتم استخدامها بنجاح في العديد من الدراسات [14-17].

.c. تحليل الموثوقية:

تم اعتماد أقطار الانابيب في الشبكة كمتحولات قرار. وتم اعتماد الكلفة كتابع هدف نرغب بتخفيضه للقيمة الأقل وتم نمذجة الموثوقية كتابع هدف للنمذجة متعددة الأهداف حيث:

$$Min f1 = \sum_{i=1}^N c_i D_i l_i \quad (1)$$

$$Max f2 = Reliability \ factor \quad (2)$$

حيث $f1$ كلفة الشبكة و $f2$ معامل الموثوقية للشبكة، c_i كلفة المتر الطولي للأنبوب من القطر المحدد، D_i القطر الخاص بالأنبوب المحدد، l_i طول الأنبوب [18].

.d. معاملات الموثوقية:

تم تقديم العديد من قيود الموثوقية بدرجات مختلفة من التعقيد حيث تقدم هذه القيود بعض القرارات الرئيسية حول قدرة شبكة الإمداد مياه الشرب على معالجة شروط التغير ضمن الشبكة وبالتالي الحصول على الحل الأكثر مثالية ضمنها ومقارنة الأداء، تتمثل المعاملات الرئيسية التي تؤخذ بعين الاعتبار من أجل دراسة موثوقية الشبكة بما يلي:

معامل المتانة (I_r): Resilience Index

يمثل دليل المتانة والمقدم من قبل Todini القياس التقليدي المعتمد ضمن شبكات الإمداد المياه حيث يأخذ بعين الاعتبار القدرة الهيدروليكية للتغذية متناسبة مع القدرة الهيدروليكية المتاحة، يقاس هذا المعامل ضمن مجال من 0 إلى 1 وتمثل وفقاً للعلاقة التالية:

$$I_r = \frac{\sum_{j=1}^{nn} q_j (H_j - H_j^{min})}{\sum_{k=1}^{nr} q_k H_k + \sum_{i=1}^{np} \frac{P_i}{\gamma} - \sum_{j=1}^{nn} q_j H_j^{min}} \quad (3)$$

حيث nn عدد العقد في الشبكة، nr عدد عقد التغذية، np عدد المضخات، H_j الضاغط المتوفر عند العقد، H_j^{min} الضاغط الأصغري المطلوب، q_j التدفق عند العقد، q_k التدفق عند عقدة التغذية، H_k الضاغط لدى عقدة التغذية، P_i القدرة في حال توفر المضخات، γ وزن الماء المحدد [19].

معامل (MRI): Modified Resilience Index

تم تقديمه من قبل Jayaram and Srinivasan والذي يتفوق نظرياً على معامل المتانة المقدم من قبل Todini وهو يتناسب بصورة مباشرة مع قدرة التغذية العظمى عند عقد الطلب، يمكن أن يكون هذا المعامل أكبر من 1 [19].

$$MRI = \frac{\sum_{j=1}^{nn} q_j(H_j - H_j^{min})}{\sum_{j=1}^{nn} q_j H_j^{min}} \quad (4)$$

معامل *Minimum Surplus Head Index (IM)*

وتمثل الفارق بين ضغط العقدة المتاح والضغط الأصغري ضمن الشبكة، زيادة هذا المعامل يسمح بزيادة موثوقية الشبكة بشكل كبير.

$$I_m = \min\{H_j - H_j^{min}\} \quad (5)$$

تمثل المعاملات السابقة الموثوقية الهيدروليكية للشبكة [19].

e. الموثوقية الميكانيكية للشبكة:

تتعلق الموثوقية الميكانيكية للشبكة بقيم الأعطال التي تتعرض لها الشبكة خلال الفترة الزمنية المحددة، تعطى علاقة الموثوقية الميكانيكية بالعلاقة:

$$R_M = 1 - [(1 - MRI) \times (1 - A)] \quad (6)$$

حيث R_M الموثوقية الميكانيكية، MRI الموثوقية الهيدروليكية، A معدل توافر العنصر.

يتعلق معدل توافر العنصر ببيانات الأعطال السابقة والتي تعرضت لها الشبكة وفقاً للعلاقة:

$$A = 1 - P_f \quad (7)$$

$$P_{f(pipes)} = \frac{\lambda_{pipes} \times L \times TR}{365} \quad (8)$$

$$\lambda_{pipe} = \frac{No\ of\ Breaks\ Per\ year}{Pipe\ length(km)} \quad (9)$$

حيث A توافره العنصر، P_f احتمالية الفشل، λ_{pipe} معدل الكسر والذي يعتمد على البيانات التاريخية السابقة، L طول الانبوب بالكيلومتر، TR زمن الصيانة المطلوب [20].

تبدأ الخوارزمية بعملية تحميل سجل الأعطال ومن ثم إدخال بيانات القطاعات ومتطلبات التدفق والضغط وأطوال الأنابيب في كل قطاع من المقاطع، بعد عملية تنظيم المقاطع تم إدخال مجموعة من الأنابيب مع خصائص التدفق والضغوط لها وحساب الموثوقية بالنسبة للكلفة.

f. الموثوقية الهيدروليكية للشبكة:

تصف الموثوقية الهيدروليكية أداء النظام لتحقيق متطلبات التدفق المطلوبة. ويحسب التدفق الوسطي ضمن شبكة الأنابيب وفقاً للعلاقة التالية:

$$Q_{ave} = Q_{req} \left(\frac{P_i}{P_{min}} \right)^{nn} \quad (10)$$

حيث Q_{ave} متوسط التدفق المطلوب، Q_{req} التدفق بالأنبوب، P_i الضغط في الأنبوب المحدد، P_{min} الضغوط الأدنى المسموح، nn عدد الأنابيب. بعد ذلك يتم حساب أداء الشبكة عن طريق حساب متوسط التدفق بالنسبة للتدفق المطلوب وفقاً للعلاقة:

$$NR = Q_{ave} / Q_{req} \quad (11)$$

تحدد هذه النسبة الفعالية الهيدروليكية للتدفق ضمن الشبكة، ولحساب القيمة العظمى للتدفق ضمن الشبكة يجب أن نأخذ بعين الاعتبار قيمة التدفق الوسطي الكلي في الشبكة منسوباً إلى التدفق الكلي المطلوب لتحديد ضياعات الضغوط والضياعات ضمن الشبكة وفقاً للعلاقة التالية:

$$vr = \frac{\text{sum}(Q_{ave})}{\text{sum}(Q_{req})} \quad (12)$$

$$nf = nr \frac{1}{nn} \quad (13)$$

$$sr = vr * nr \quad (14)$$

$$R = 1 - sr \quad (15)$$

حيث nr عدد مصادر التزويد، nn عدد العقد في الشبكة.

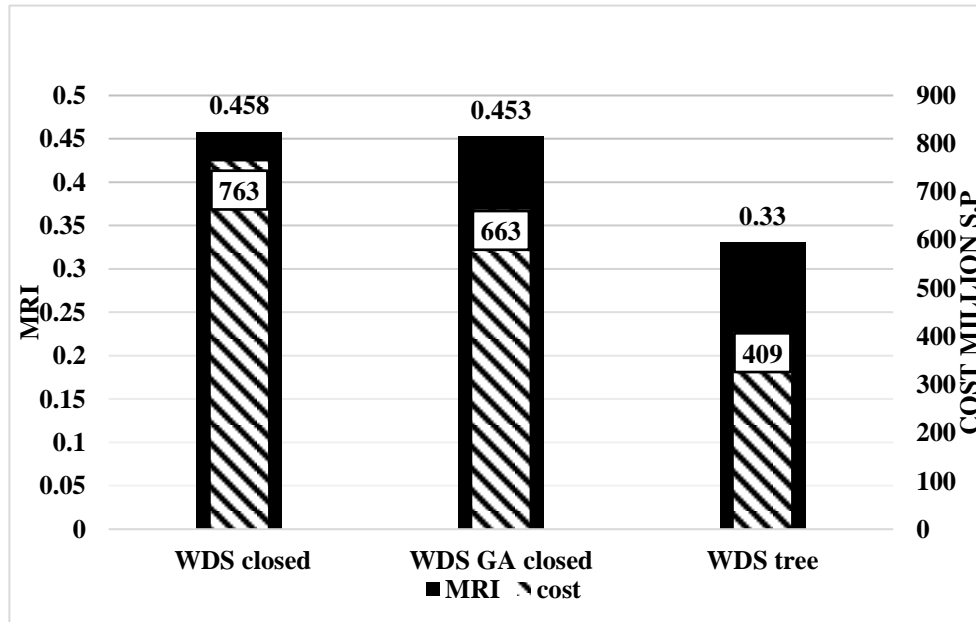
إن القيمة العظمى التي تنتج في المصفوفة النهائية لكل قطاع من القطاعات sr ستحدد الموثوقية الهيدروليكية للشبكة ولحساب الموثوقية العامة (الفعالة) R للقطاع المدروس [21].

النتائج والمناقشة:

تم تطبيق الدراسة على الشبكة الموجودة حالياً في مدينة جبلة، تم في البداية تحويل هذه الشبكة إلى شبكة مغلقة وحساب معاملات الموثوقية لكلا الشبكتين المتفرعة والمغلقة ومن ثم إيجاد الحل الأمثل لتصميم الشبكة المغلقة اعتماداً على الخوارزمية الجينية وحساب معاملات الموثوقية لها. ودراسة الموثوقية خلال ثلاثة أعوام اعتماداً على سجلات الأعطال الحقيقية.

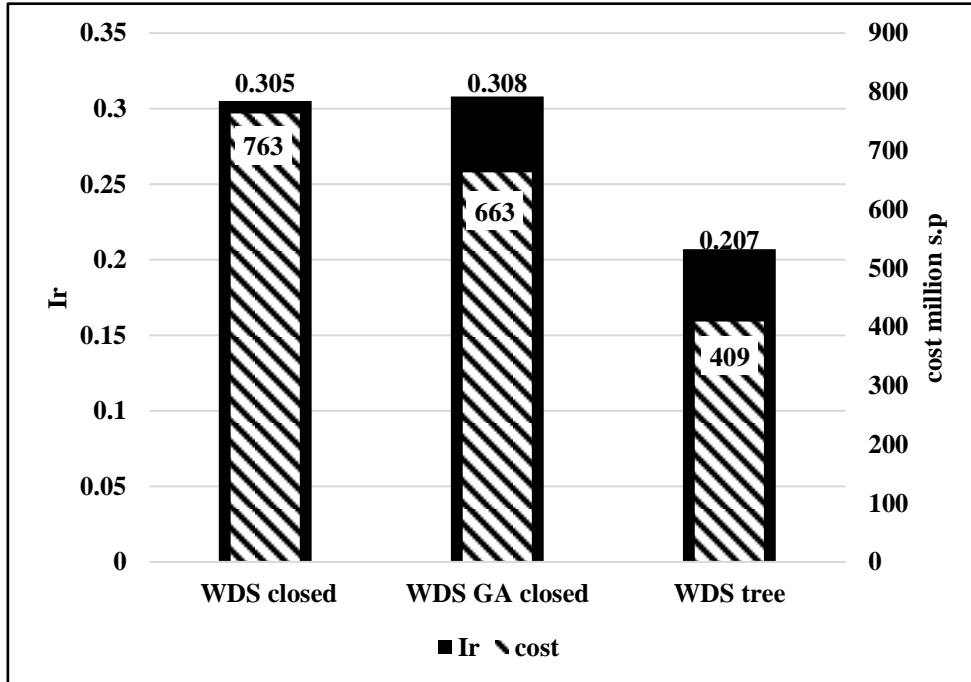
g. قيم المعاملات MRI، Ir، Im لنماذج الشبكة:

يوضح الشكل (3) معامل MRI للشبكة المتفرعة، والشبكة المغلقة، والشبكة الناتجة عن الحل الأمثل باستخدام الخوارزمية الجينية، يوضح المخطط ارتفاع هذا المعامل بالنسبة للشبكة المغلقة نظراً لامتلاكها قيم ضغط أعلى في الأنابيب لنفس قيمة الأقطار في الشبكة المتفرعة إلا أنها تعاني من انخفاض الفعالية في حال تعطل إحدى العقد وخروج كامل الخط عن الخدمة. تقدم الشبكة المغلقة الموثوقية الأعلى مع زيادة عالية بالكلفة وبالتالي فإن اختيار الحلول الناتجة عن الخوارزميات الجينية سيعطي الحل الأفضل بالنسبة للموثوقية والكلفة.



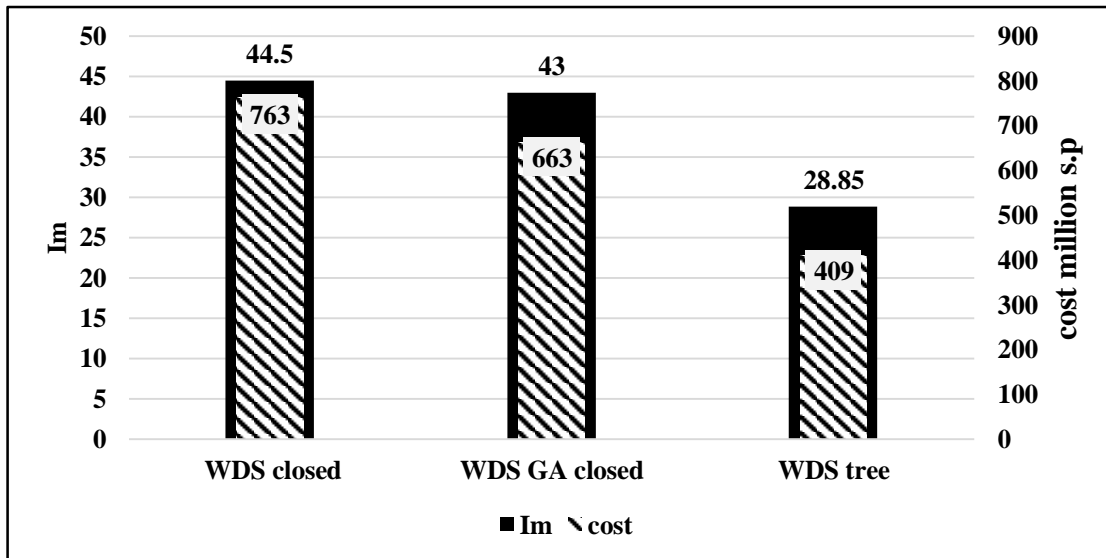
الشكل (3) معامل MRI لنماذج الشبكات المتفرعة، المغلقة، الجينية

في حين يوضح الشكل (4) معامل Ir لنماذج الشبكات المتفرعة، المغلقة، الجينية. وجد أن هناك تقارب لقيم المعاملات Ir لنماذج الشبكة المتفرعة، المغلقة، الجينية وإن كان الحل الناتج عن الخوارزمية الجينية قد أعطى قيمة المعامل الأفضل، أما الكلفة للحل الأمثل الناتج عن الخوارزمية الجينية فقد كانت أقل بحوالي 16% مقارنة مع الشبكة المغلقة.



الشكل (4) معامل Ir لنماذج الشبكات المتفرعة، المغلقة، الجينية

أما الشكل (5) الآتي فيبين معامل Im لنماذج الشبكات المتفرعة، المغلقة، الجينية، نلاحظ أن الشبكة المتفرعة قد كانت ذات معامل أقل بكثير مقارنة مع الشبكات المغلقة والجينية وكما في المعامل السابق Ir فقد قدم الحل من قبل الخوارزمية الجينية معاملاً مرتفعاً مع كلفة أقل وهذا يؤكد على فعالية الحلول المقدمة من الخوارزميات الفائقة في توفير الكلفة مع أداء أعلى بالنسبة لشبكات توزيع المياه.



الشكل (5) معامل Im لنماذج الشبكات المتفرعة، المغلقة، الجينية

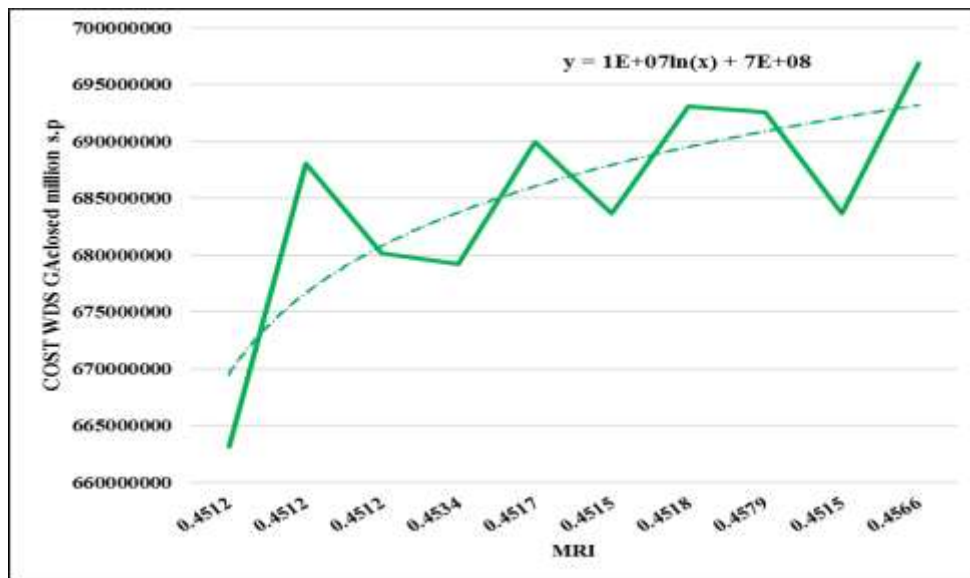
h. قيم المعاملات **MRI**، **Ir**، **Im** للحلول المحسنة الناتجة عن الخوارزمية الجينية:

تم أخذ قيم معاملات الموثوقية **MRI**، **Ir**، **Im** كمعايير تقييم أداء الشبكة كهدف ثاني بالإضافة إلى الكلفة وكانت جميع الحلول مناسبة. يوضح الشكل (6) دراسة تغير معامل **MRI** (هو معامل يتراوح بين 0 و 1) مع تغير الكلفة للحلول الأفضل المقدمة من الخوارزمية الجينية حيث تم تقسيم عدد الحلول إلى مجموعات جزئية كل منها مؤلف من خمسة حلول واختيار الحل الأقل كلفة، ومن ثم تم تجميع الحلول الناتجة واختيار الأفضل من كل مجموعة وهكذا بصورة تكرارية حتى تم الحصول على الحلول ذات الكلفة الأفضل حيث تم اختيار عشرة حلول ذات الكلفة الأدنى وتم إجراء عملية حساب معاملات الموثوقية عليها.

من الشكل (6) نلاحظ أن الكلفة قد تغيرت ما بين 663 مليون ليرة والتي تمثل الكلفة الأدنى بين جميع الحلول المثالية التي تم اختيارها من قبل الخوارزمية الجينية مع معامل موثوقية مقابل لها بمقدار 0.4512 في حين بلغ الحل الأعلى كلفة المقدم من هذه الخوارزمية 697 مليون ليرة والذي يقابل معامل موثوقية **MRI** بمقدار 0.4566. سمحت هذه التغيرات الطفيفة في المعاملات السابقة بتبيان جودة الحل الذي تم الحصول عليه. يبين الشكل (6) مخطط **cost-MRI** الانسيابية الأفضل للحلول المتاحة والتي تتغير ضمن مجال ضيق وهو ما يمكن اعتباره المخطط الأفضل لاختيار الحل المناسب من مجال الحلول.

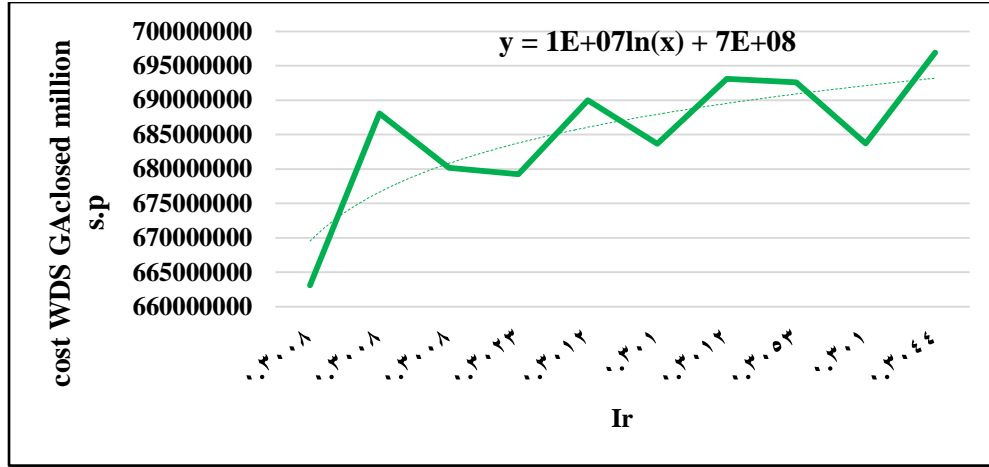
بعد استنتاج الحلول في كل مرحلة تم تمريرها إلى برمجية **EPANET** للتأكد من تحقيقها الشروط الهيدروليكية وتم رفض الحلول التي لا تحقق تلك الشروط حتى ولو كانت ذات كلفة أقل.

سمحت الأداة المرفقة مع برنامج **Excel** على استنتاج المعادلة المعبرة عن التنبؤ بالكلفة وفقاً لمعامل الموثوقية المطلوب أو العكس حيث كانت المعادلة المثالية الناتجة والمعبرة عن تغير الحلول المقدمة بشكل لوغاريتمي حيث تحدد هذه العلاقة بالشكل: $cost = 10^7 \ln(MRI) + 7 * 10^8$

الشكل (6) تغير معامل **MRI** مع تغير الكلفة

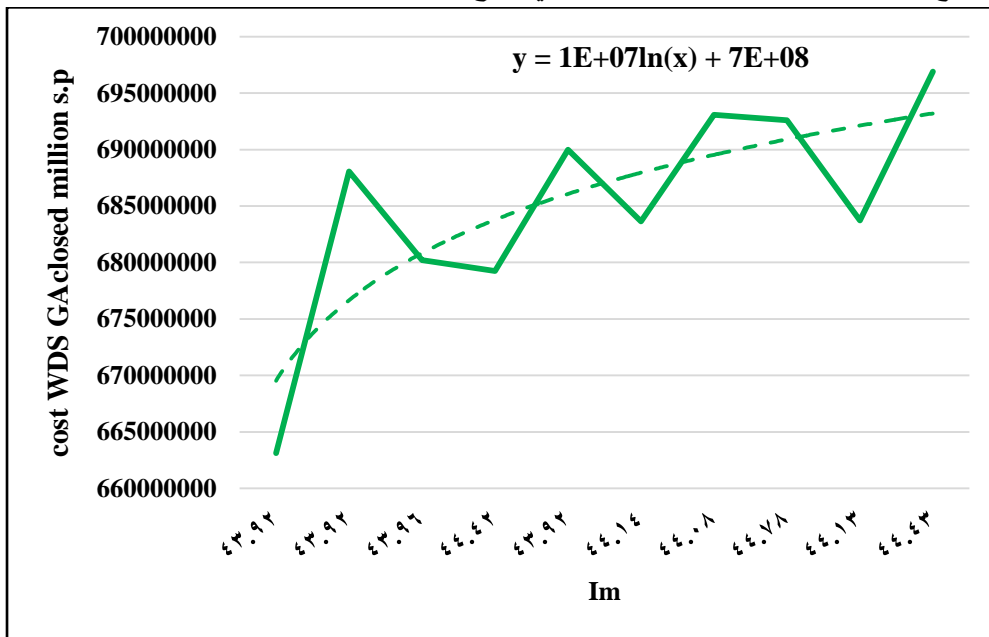
بنفس الطريقة، يوضح الشكل (7) معامل المتانة للشبكة، يجب أيضاً أن يتراوح معيار **Ir** بين 0 و 1 حيث نلاحظ من المخطط وجود حلول ذات قيم **Ir** منخفضة ولا تحقق معيار **Ir** رغم ارتفاع الكلفة علماً أنه كلما ارتفعت قيمة معيار **Ir** كان أداء الشبكة أفضل. كما أن تغير طفيف في معيار **Ir** ما بين 0.3008 و 0.3044 قد تسبب بزيادة الكلفة بنحو

100 مليون ليرة سورية وعليه فإن اختيار الكلفة الأدنى ضمن هذا المعيار مناسبة للاختيار كحل مقبول، كما أن قيمة المعامل Ir العظمى في هذه الدراسة تنتج عن كلفة متوقعة بمقدار 693 مليون ليرة بفارق نحو 60 مليون ليرة عن الحل ذو الكلفة الأدنى والنتائج عن الخوارزمية الجينية.



الشكل (7) تغير دليل المتانة Ir مع تغير الكلفة

كذلك يوضح الشكل (8) مخطط cost-Im زيادة موثوقية الشبكة في حال ارتفاع هذا المعامل حيث يعطي تمثيلاً على أداء الشبكة وفقاً لمجموعة الحلول المقدمة من الخوارزمية الجينية، كذلك نلاحظ من هذا المخطط تغير طفيف بقيمة المعامل Im مع تغير كبير بالكلفة ضمن الشبكة وبالتالي نقترح أيضاً اختيار الشبكة ذات الكلفة الأقل.



الشكل (8) تغير معامل Im مع تغير الكلفة

وفقاً لأداة GANetXL نلاحظ أن الحل ذو الكلفة (673) مليون ليرة سورية والمقابل لمجموعة من الأقطار يمثل الحل الأمثل وفقاً لمعايير الأداء السابقة مع ارتفاع طفيف في الكلفة عن الحل الأقل كلفة والممثل بالقيمة (663) مليون ليرة سورية.

تم الاعتماد في نمذجة الموثوقية أيضاً على معدلات الكسر لأسباب مختلفة خلال ثلاث سنوات حسب القطاعات المقسمة من أجل الوصول إلى معدلات الموثوقية العالية ضمن الشبكة نحتاج إلى إضافة تكاليف تتعلق بكلفة الاستبدال وبنية الأنابيب والتي يتم حسابها اعتماداً على العلاقة التالية:

$$C_{ST}(i,j)=LP(j)*CS(D(:,j)) \quad (16)$$

حيث C_{ST} كلفة القطاع، LP طول الأنبوب، CS كلفة الصيانة السابقة للقطاع المحدد. ويجب أن تضاف هذه القيمة بهدف تحقيق الموثوقية الكاملة للشبكة [20]. تم تقسيم الشبكة إلى مجموعة من المقاطع التي تحدد قطاعات محددة ومن ثم تطبيق الإجراء الموضح بالمعادلة (16) على مجموعة المقاطع ضمن الشبكة حيث تم الوصول إلى النتائج الموضحة في الجدول (1).

بعد حساب النسبة المئوية لسجلات الأعطال والموضحة في الجدول (2)، تبين لنا أنه واعتماداً على نسب الكسر الخاصة بأنابيب الأنابيب في الجدول (1) ومن خلال العلاقة بين الموثوقية ونسبة معدلات الكسر ضمن المقاطع انخفاض موثوقية القطاع مع ارتفاع معدلات الكسر والاعطال مما يعني بالنتيجة أن تسبب هذه الأعطال تكاليف إضافية، من نتائج الموثوقية الخاصة بهذه القطاعات تم اعتماد أقل نسبة موثوقية ضمن القطاع الواحد.

الجدول (1) نتائج الموثوقية لكل من المقاطع في شبكة مياه مدينة جبلة:

انابيب القطاع	الموثوقية %	الكلفة الإضافية (ألف ليرة سورية)	معدل الأعطال من السجلات
PI68, PI69, P37, P38, PI75, PI74, PI73, PI72, PI71, P16, P17, P36, PI66, PI67	98.0222	11149	4.2%
P15, PI70, P40, P39, P34, P35, P26, P25, P24, P23, P22, P21, P20, P19, P18	97.78	4867	34.04%
PI51, PI52, PI54, PI55, PI56, PI57, PI58, PI59, PI60, P3, P4, P5, PI62, PI61, P7, P6, PI53, PI46, PI47, PI48, PI49, PI50, P1	98.27	23448	23.4%
PI64, P28, P27, PI63, PI65, P30, P31, P32, P33, P41, P42, P43, P44, P45, P 51, P 53, P 55, P29	98.8	25646	14.89%
2, P9, P8, P10, P11, P12, P13, P14	99.93	9684	21.27%

P الأنابيب بالشبكة الواقعية لشبكة توزيع مياه الشرب لمدينة جبلة.

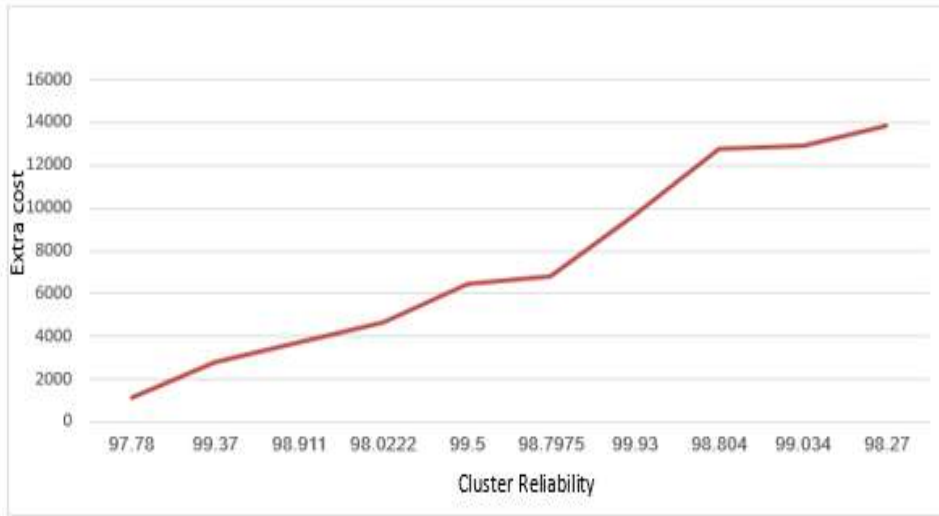
PI الأنابيب المضاف لتحويل الشبكة المتفرعة لتوزيع مياه الشرب لمدينة جبلة لتحويلها لمغلقة.

نلاحظ من الجدول (1) اختلاف قيم تكاليف الصيانة الإضافية بين حالات الموثوقية المختلفة وهذا يعتمد على طول الأنابيب الموجودة ضمن القطاع المدروس بالإضافة إلى أقطار هذه الأنابيب. وعند العودة إلى سجلات الأعطال وعلاقتها مع أقطار الأنابيب لاحظنا علاقة نسبة الأعطال بالنسبة لقطر الأنبوب المدروس موضحة في الجدول (2):

الجدول (2) نسبة الأعطال بالنسبة لأقطار الأنابيب

نسبة العطل	قطر الأنبوب (mm)
12.76%	450
10.63%	250
6.38%	200
19.14%	150
51%	110

أي أن معظم الأعطال حدثت في الأنابيب ذات القطر 110 mm الأمر الذي رفع كلفة الصيانة في المقاطع التي تحتوي على عدد أكبر من هذه الأنابيب حيث يرتفع معدل الأعطال مع انخفاض أقطار الأنابيب. يوضح الشكل (9) العلاقة بين الموثوقية والكلفة الناتجة عن الجدول (1) وهي تمثل قيمة تصاعدية، نلاحظ من المخطط بأن تغير الكلفة مع الموثوقية عملية غير خطية نظراً للتباين بين القطاعات وعدد الأنابيب واحتواء بعض القطاعات على عدد من الأنابيب ذات الأقطار الأصغر والأكثر تعرضاً للأعطال منها في مقاطع أخرى الأمر الذي يؤثر على الكلفة الكلية.



الشكل (9) العلاقة بين الموثوقية والكلفة الإضافية لصيانة المقاطع

ويوضح الشكل (10) الموثوقية عند العقد المختلفة بالنسبة للأنابيب التي تعرضت للأعطال. تم تحديد أطوال الأنابيب وعدد مرات الكسر التي تعرضت لها بالإضافة إلى عدد أيام التوقف خلال الفترة المدروسة والمقدرة بثلاثة سنوات، حيث تم حساب الموثوقية لعقد الشبكة وفقاً للمعادلات التالية:

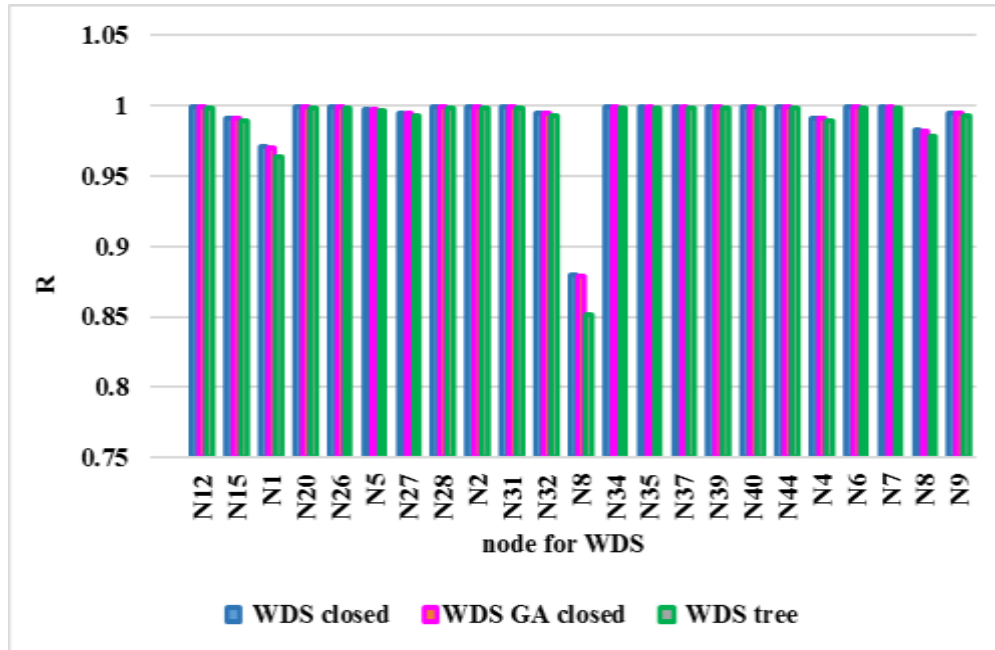
$$\lambda = \frac{NP(i)}{\text{length of pipe}(i)} \quad (17)$$

$$pf = \frac{NP * Nd * \lambda}{365} \quad (18)$$

$$A = 1 - pf \quad (19)$$

$$R = ((1 - MRI) * (1 - A)) \quad (20)$$

حيث NP هو عدد مرات الكسر للأنبوب خلال الفترة المدروسة، و Nd عدد أيام العطل (أي فترة خروج الأنبوب عن الخدمة) و R تمثل الموثوقية العامة للعقد [16].



الشكل (10) الموثوقية للعقد لنماذج الشبكات المتفرعة، المغلقة، الجنبية

نلاحظ من هذا المخطط أن العقد N_1 ، N_8 تمتلك أقل قيم للموثوقية ضمن الشبكة، يتبع الأنبوب P_1 إلى خط التغذية الرئيسي والذي يقوم بتغذية الشبكة ضمن مراحل العمل والمحاكاة، في حال حدوث أي خطأ ضمن هذا الأنبوب عندها لن يكون هنالك أي موثوقية ضمن الشبكة وبالتالي لا يدرس هذا الأنبوب ضمن دراسة الفشل. وفقاً للمخطط السابق فإن الأنابيب P_2 ، P_{34} المتصلة مع العقد 1 و 8 تحتاج إلى رفع قيم الأقطار بهدف زيادة موثوقية الشبكة وتقليل الأعطال ونلاحظ ارتفاع قيمة الموثوقية في القطاعات على الرغم من الأعطال بعد تحويل الشبكة المتفرعة إلى حلقة.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- تم في هذا البحث تقييم أداء بعض معاملات الموثوقية لشبكة الإمداد بمياه الشرب لمدينة جبلة، واستخدام أداة GANetXL لإجراء التحسين لهذه الشبكة فتم الحصول على الحل الأمثل بالكلفة الأقل والموثوقية الأعلى، حيث بينت الدراسة:
- ❖ إن تحويل الشبكات المتفرعة إلى مغلقة يؤدي إلى رفع موثوقية هذه الشبكة حيث ارتفع معامل MRI لشبكة جبلة بعد تحويلها لمغلقة من 0.33 إلى 0.458 ولكن الكلفة ازدادت حوالي 80%.
- ❖ التصميم الهندسي لشبكات مياه الشرب باستخدام الخوارزمية الجينية يقدم الحل الأمثل بالكلفة الأقل والموثوقية الأعلى حيث حصلنا على نفس قيمة الموثوقية MRI للشبكة المغلقة مع انخفاض بالكلفة 16%.
- ❖ بينت نتائج المقارنة عدم وجود علاقة خطية بين الموثوقية والكلفة.
- ❖ التحليل متعدد الأهداف يعطي نتيجة أفضل من التحليل بهدف واحد وخاصة عند أخذ الموثوقية بعين الاعتبار.

❖ يعد معامل مرونة الشبكة Ir ضعيف الأداء عند مقارنته بالمعاملات الأخرى MRI، Im تحت ظروف فشل الأنابيب خاصة في الشبكات التي تتضمن أقطار أنابيب صغيرة.

التوصيات:

➤ اعتماد طرائق الأمثلة وخاصة طرائق البحث الفائق (meta-heuristic) لتصميم شبكات مياه الشرب وإعادة تأهيل الشبكات القائمة.

➤ القيام بدراسة وإيجاد الحل الأمثل لشبكة الإمداد بمياه الشرب لمدينة جبلة بتوابع هدف إضافية (كجودة المياه ورضا المستخدمين وتقليل الأثر البيئي وغيرها من العوامل المؤثرة) ودراسة إمكانية التعميم على شبكات أخرى.

➤ القيام بدراسة وإيجاد الحل الأمثل بطرائق أخرى للبحث الفائق متعدد الأهداف كخوارزمية البحث المتناغم، وخوارزمية مستعمرة النمل وخوارزمية محاكاة التلدين وغيرها.

References:

1. A. Kaufmann, D. Grouchko and R. Croun, "Mathematical models for the study of the reliability of systems," Academic, New York, US, 1977.
2. M. Cullinane, K. Lansey and L. Mays, "Optimization availability- based design of water distribution networks," Journal of Hydraulic Engineering, vol. 118, no. 3, pp. 420-441, 1992.
3. I. Goulter, "Analytical and simulation models for reliability analysis in water distribution systems," In: Cabrera E, Vela A (eds) Improving efficiency and reliability in water distribution systems. Kluwer Academic Publishers, 1995.
4. M. A. Al-Zahrani and J. L. Syed, "Evaluation of municipal water distribution system reliability using minimum cut-set method," Journal of King Saud University – Engineering Sciences, vol. 18, no. 1, pp. 67-81, 2005.
5. Ostfeld, "Reliability analysis of water distribution systems," Journal of Hydroinformatics, vol. 6, no. 4, pp. 281-294, 2004.
6. A. Gheisi, M. Forsyth and M. and Gh. Naser, "Water Distribution Systems Reliability: A Review of Research Literature," Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 142, no. 11, 2016.
7. Dziedzic, Rebecca and Karney, Bryan W., "Performance Index for Water Distribution Networks under Multiple Loading Conditions," Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 142, no. 1, 2016.
8. Z. Kleiner, Z. Liu, B. Rajani, L. Wang and W. Condit, "Condition Assessment Technologies for Water Transmission and Distribution Systems," Environmental Protection Agency, U.S., 2012.
9. L. Parvizsedghy, I. Gkounti, A. S. T. Zayed, M. Alsharqawi, H. E. Chanati, M. El-Abbasy and F. Mosleh, "Deterioration Assessment Models for Water Pipelines," International Journal of Civil and Environmental Engineering, vol. 11, no. 7, 2017.
10. D. R. Cox, "Regression Models and Life Tables," Journal of Royal Statistic Society, vol. 34, no. B, pp. 187-220, 1972.
11. Y. Kleiner and B. Rajani, "Forecasting Variations and Trends in Water-Main Breaks," Journal of Infrastructure Systems, vol. 8, no. 4, pp. 122-131, December 2002.
12. A. Scheidegger, L. Scholten, M. Maurer and P. Reichert, "Extension of pipe failure models to consider the absence of data from replaced pipes," Water Research, vol. 47, no. 11, pp. 3696-3705, 2013.

13. L. Parvizsedghy, I. Gkounti, A. S. T. Zayed, M. Alsharqawi, H. E. Chanati, M. El-Abbasy and F. Mosleh, "*Deterioration Assessment Models for Water Pipelines*," International Journal of Civil and Environmental Engineering, vol. 11, no. 7, 2017.
14. Savić, D. A., J. Bicik and M. S. Morley (2011). "*A DSS generator for multiobjective optimization of spreadsheet-based models*." Environmental modelling & software 26(5): 551-561.
15. Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan (2002). "*A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*." IEEE transactions on evolutionary computation 6(2): 182-197.
16. Moghaddam, A., A. Alizadeh, A. Faridhosseini, A. Ziaei and D. F. Heravi (2018). "*Optimal design of water distribution networks using simple modified particle swarm optimization approach*." Desalination and Water Treatment In press: 1-12.
17. Miri, S. M. and A. Afshar (2014). "*Optimum Layout for Sensors in Water Distribution Networks through Ant Colony Algorithm: A Dual Use Vision*." Journal of Water and Wastewater (parallel title); Ab va Fazilab (in persian) 25(3): 67-75.
18. Moghaddam, A., R. Peirovi-Minaee, H. Rezaei, A. Faridhosseini and A. N. Ziaei (2020). "*The Evaluation of Reliability Indices in Water Distribution Networks under Pipe Failure Condition*" Drinking Water Engineering and Science, vol. 37.
19. Todini, E. (2000). "*Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach*." Urban water 2(2): 115-122.
20. Jayaram, N. and K. Srinivasan (2008). "*Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing*." Water Resources Research 44(1).
21. A. Scheidegger, J. P. Leitao and L. Scholten, "*Statistical failure models for water distribution pipes - a review from a unified perspective*," Water Research, vol. 83, pp. 237-247, 2015.