

إيجاد الكلفة التصميمية الأمثل لشبكة الإمداد بمياه الشرب لمدينة جبلة باستخدام الخوارزمية الجينية وخوارزمية البحث المتناغم

د. هناء سلمان*

د. عادل عوض**

د. فيروز شكور***

فاطمة سلمان****

(تاريخ الإيداع 22 / 4 / 2020. قُبل للنشر في 5 / 10 / 2020)

□ ملخص □

تعد أمثلة كلفة إنشاء شبكات توزيع المياه إحدى القضايا الأساسية لخطط إدارة المياه. وفي السنوات الأخيرة اكتسبت طرائق (Meta-Heuristic) شعبية وأهمية كبيرة بين الباحثين بسبب دقتها العالية. في هذا البحث، تم استخدام كلاً من الخوارزمية الجينية (Genetic Algorithm) وتقنية البحث المتناغم (Harmony Search) لأمثلة كلفة التصميم لشبكة مياه مدينة جبلة في محافظة اللاذقية. تم استخدام برنامج Epanet من أجل تصميم وتحليل شبكة توزيع المياه القائمة لمدينة جبلة بعد تحويلها لمغلقة وتمت أمثلة الكلفة لهذه الشبكة بواسطة كلاً من برنامج HSNET وبرنامج WATERGEMS باستخدام كل من تقنية البحث المتناغم والخوارزمية الجينية. أظهرت النتائج أن كلفة التصميم تناقصت بمقدار 28% و 37% باستخدام الخوارزمية الجينية وتقنية البحث المتناغم على التوالي، وذلك عن الكلفة المحسوبة للشبكة الحالية بعد تحويلها لمغلقة، وبالإضافة إلى ذلك وجدنا أن تقنية البحث المتناغم كانت أكثر كفاءة من الخوارزمية الجينية.

الكلمات المفتاحية: الكلفة الأمثل، الخوارزمية الجينية، تقنية البحث المتناغم، شبكة توزيع مياه شرب مدينة جبلة.

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

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

*** مدرسة - قسم الذكاء الصناعي-كلية الهندسة المعلوماتية -جامعة تشرين-اللاذقية - سورية.

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

Email: fatmaslman88@gmail.com

Optimal Cost Design of the Water Distribution Network for Jableh City Using Genetic Algorithm and Harmony Search Algorithm

Dr. Hana Slman*

Dr. Adel awed**

Dr. Feroze shakor***

Fatma Slman****

(Received 22 / 4 / 2020. Accepted 5 / 10 / 2020)

□ ABSTRACT □

Optimal cost building of water distribution networks is one of the fundamental issues in water management plans. In recent years, high accuracy of meta-heuristic methods has gained attention of researchers. In this research, genetic algorithm and harmony search methods were used for optimal cost design of water distribution network in Jableh, Lattakia governorate.

The Epanet software is used to design and analyze the water distribution network after converted it to closed, and optimal cost design of the network is done by HSNET and WATERGEMS software for the harmony search and genetic algorithms, respectively. The results showed design costs were decreased 28% and 37% by using the genetic algorithm and harmony search algorithm, respectively. In relation to the calculated cost of the existing network after it's been converted to closed. Furthermore, the Harmony search method was found more optimal than the genetic algorithm.

Keywords: Optimal Cost, Genetic Algorithm, Harmony Search Algorithm, Jableh Water Distribution Network.

* Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

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

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

مقدمة:

تشكل أنظمة الإمداد بالمياه أحد العوامل الاجتماعية الأساسية، لأنها توفر المياه اللازمة والأمنة لجميع الأنشطة البشرية في المجتمع. فالغرض الرئيسي من هذه الشبكات هو توفير المياه للمستهلكين بالضغوط الكافي والكمية والجودة المطلوبتين، ولتحقيق هذه الأهداف تم إجراء بحوث متعددة عن التصميم والتشغيل الأمثل وكذلك الصيانة والاستثمار لهذه الشبكات. بدأ التصميم الأمثل لشبكات الإمداد بهدف واحد هو الكلفة مع مراعاة القيود الهيدروليكية وجودة المياه. في الماضي كان يتم تصميم هذه الشبكات اعتماداً على مبدأ (التجربة - الخطأ) استناداً إلى خبرة المصممين، ومع ذلك لا تضمن هذه التصاميم الحصول على الحلول المثلى لأنها تعتمد بشكل أساسي على الخبرة المهنية فقط. لاحقاً تم استخدام خوارزميات تصميم رياضية مثل البرمجة الخطية [1]، والبرمجة الديناميكية [2]، والبرمجة غير خطية [3] لتحقيق التصميم الأمثل مع الكلفة الأقل.

تعد خوارزميات التحسين الرياضي سهلة التطبيق في الأنظمة الصغيرة الحجم التي يمكن التعبير عن جميع عناصرها بسهولة باستخدام المعادلات الرياضية. ومع ذلك، لا يعتبر من السهل تطبيقها على الأنظمة الحقيقية على أرض الواقع [4]، ويعود هذا الأمر لأن المعادلات المرتبطة بشبكات الإمداد مثل (مصونيه الكتلة والطاقة) هي معادلات غير خطية كما أن الجريان في الشبكات الحلقية متغير في التدفق والاتجاه في معظم الأنابيب وهو غير خطي، وتؤدي زيادة عدد العقد المشتركة والأنابيب إلى مضاعفة مجموعة الحلول الممكنة. لذلك تم استخدام الصيغ الرياضية لوضع قيود للتصميم لتحقيق الكلفة الأقل، بعد ذلك تم تطوير خوارزميات Meta-Heuristic وتطبيقها في تصميم شبكات الإمداد للتغلب على العيوب والنقص في المقاربات السابقة حيث تتمكن هذه الخوارزميات من توفير الحلول المثلى في وقت زمني مقبول. يوجد العديد من الأمثلة على تطبيق هذه الخوارزميات للحصول على التصميم الأمثل بالكلفة الأقل لشبكات الإمداد بمياه الشرب مثل الخوارزمية الجينية (Genetic Algorithm) [5-6] ومحاكاة التلدين (Simulated Annealing) [7] ومستعمرة النمل (Ant Colony Optimization) [8] وتقنية البحث المتناغم (Harmony Search Algorithm) [9]. تستخدم الخوارزميات فوق الإرشادية (البحث الفائق) Metaheuristic عند العمل مع مستويات أعلى وتتميز بقدرتها على تحسس التغييرات وتوجيه البحث إلى الحلول المثلى في النطاقات التي يكون العمل فيها صعباً. تعرف هذه الخوارزمية أيضاً باسم تقنيات البحث العمومية والتي تتمتع بتلك التقنيات التي تسمح لها بتجاوز الحلول المحلية. بالإضافة إلى ذلك، تستخدم هذه الخوارزمية في المسائل الصعبة إن لم نقل إنها الخيار الأفضل نظراً للتعقيد الكبير أو حجم المسألة أو عناصر أخرى في النظام مثل كون النظام غير مستمر أثناء العمل ووجود توابع هدف ممثلة بصناديق سوداء، بالإضافة إلى المعدلات العالية من الاحتمالات، وتجاوز الحلول المثالية المحلية وامتلاكها مزيج من المتحولات المستمرة والمتقطعة. تستطيع هذه الطريقة نمذجة المسائل بصورة أكثر واقعية كما أنها أقل محدودية من ناحية الخصائص المطلوبة من النموذج المدروس مثل الخطية والتوابع التفاضلية المعتمدة.

في هذا البحث سنقوم باستخدام كل من الخوارزمية الجينية وتقنية البحث المتناغم لأمثلة شبكة توزيع المياه لمدينة جبلة. تم استخدام برنامج Epanet من أجل رسم وتحليل شبكة توزيع المياه الموجودة حالياً وحساب كلفتها تبعاً للأسعار المتوفرة حالياً في السوق المحلية وتمت أمثلة الكلفة لهذه الشبكة بواسطة كلاً من (Harmony Search NET) [10] HSNET وبرنامج WATERGEMS لكل من تقنية البحث المتناغم والخوارزمية الجينية على التوالي.

أهمية البحث وأهدافه:

هناك طرائق عديدة من خوارزميات Metaheuristic واختيار الحل الأمثل يتطلب المقارنة بين عدد من هذه الطرائق. يهدف البحث إلى تقدير الكلفة الأقل لشبكة الإمداد بمياه الشرب لمدينة جبلة وإجراء التحليل الهيدروليكي لها باستخدام كلاً من الخوارزمية الجينية وخوارزمية البحث المتناغم واللذان تعدان من أفضل طرائق الأمثلة لإيجاد الحل الأمثل اقتصادياً وهيدروليكياً.

طرائق البحث ومواده:

في هذا البحث قمنا باستخدام كل من الخوارزمية الجينية وتقنية البحث التوافقي لأمثلة شبكة توزيع المياه لمدينة جبلة. تم استخدام برنامج Epanet من أجل التحليل الهيدروليكي لشبكة توزيع المياه وتمت أمثلة الكلفة لهذه الشبكة بواسطة كلاً من HSNET و WATERGEMS لكل من تقنية البحث التوافقي والخوارزمية الجينية على التوالي.

حالة الدراسة Case Study: مدينة جبلة: هي مركز منطقة جبلة في محافظة اللاذقية في شمال غرب سوريا. تطل المدينة على البحر المتوسط، وتبعد مسافة 25 كم جنوب اللاذقية. تشتهر جبلة بطبيعتها الجميلة وككل المدن الساحلية لها مناخ معتدل صيفاً وشتاءً، تسقط الثلوج على جبالها شتاءً، ومعدل سقوط الأمطار فيها حوالي (825mm.year).

مصدر التغذية:

نهر السن: يعد نهر السن أغزر أنهار المنطقة الساحلية، حيث تتراوح غزارته بين ($12-22 \text{ m}^3/\text{sec}$)، تصل غزارته الدنيا إلى ($5.5 \text{ m}^3/\text{sec}$) بينما ترتفع لتصل إلى ($27 \text{ m}^3/\text{sec}$) 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 (1000m^3) على منسوب 90 بطول 14 k.m.

☒ خط الجر الرابع من الفونت المرن بقطر 1000mm ممتد من خزان بحجم (1500m^3) على منسوب 90 بطول 13 k.m.

بالإضافة إلى آبار نبع الفوار بغزارة حوالي ($3000 \text{ m}^3 / \text{d}$) تعطى لمدينة جبلة للتغذية اليومية. يتم وصل مصادر المياه جميعها إلى الخط الداخل للمدينة بقطر 450 mm.

✓ تقدير معدل الاستهلاك المائي للسكان: تستعمل المياه في جميع الأغراض المعاشية اليومية وكذلك التجارية والصناعية والخدمية ويمكن تقدير معدل الاستهلاك المكافئ لمدينة جبلة 250 liter/person. Day حيث أن معظم سكان مدينة جبلة من ذوي الدخل المتوسط وهذه القيمة المعتمدة في وحدة مياه جبلة.

اتبعت المنهجية التالية من أجل المنطقة المدروسة:

✓ تم الحصول على مخططات الأتوكاد لمناطق مدينة جبلة مقسمة لستة مناطق (ضاحية المجد - الفيض - منطقة الصناعة - ضاحية الأسد - النقعة - الجببيات الشرقية والغربية - العمارة - الجركس).

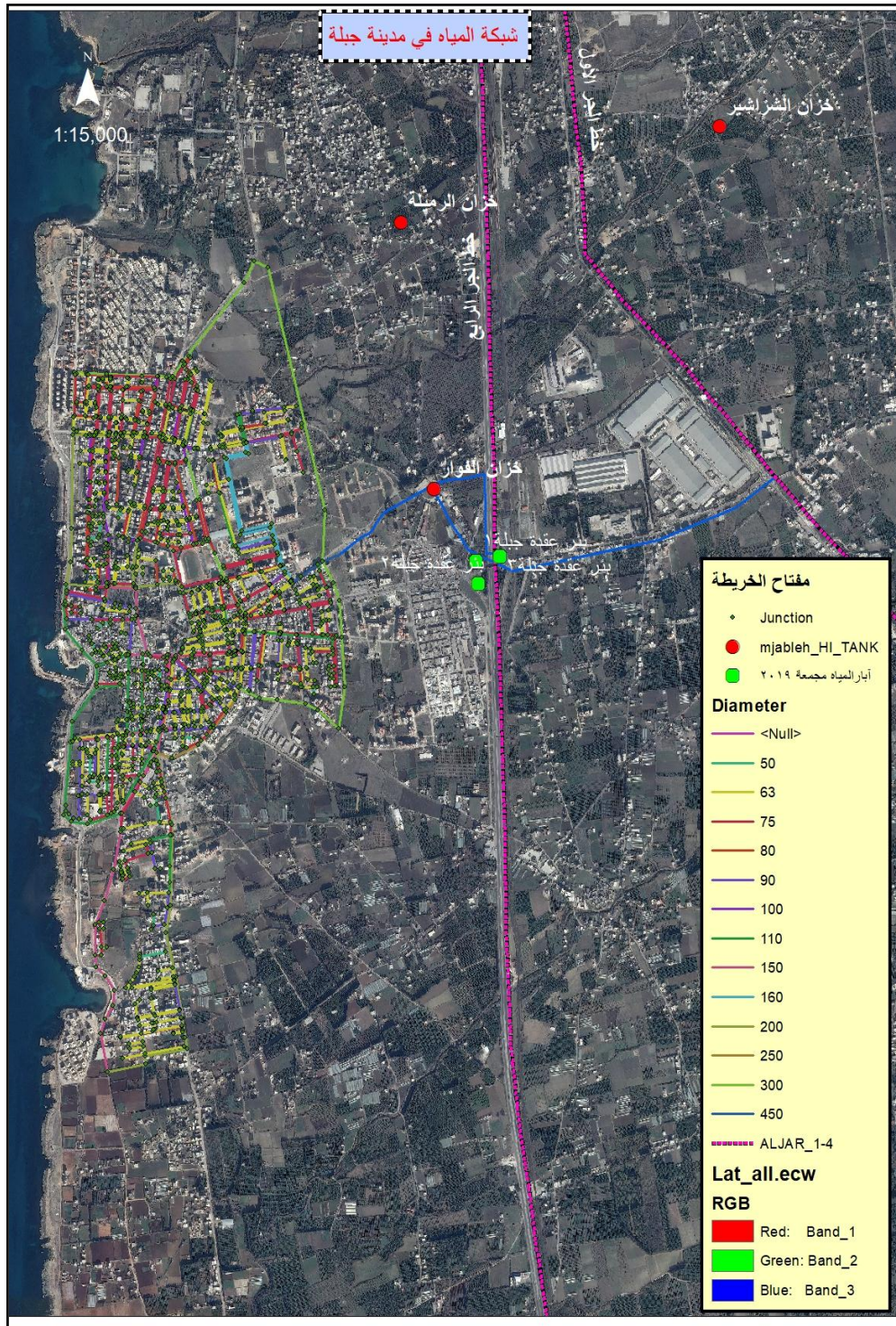
✓ كذلك الحصول على المخطط التنظيمي لمنطقة الدراسة من بلدية جبلة مع أعداد السكان لهذه الأحياء والمناطق وعدد الطوابق المسموحة في كل منها.

✓ تم ربط مخططات الاتوكاد للمناطق مع بعضها ومن ثم تنزيلها على المخطط التنظيمي للمدينة.
 ✓ كما استخدمت نظم المعلومات الجغرافية لتشخيص حالة شبكة توزيع المياه في مدينة جبلة: حيث تسمح الخيارات المتعددة المتوفرة في برنامج GIS بالحصول على خرائط الشبكة وخصائصها المختلفة وترتبط كل طبقة (أو مستوى) بسمة معينة جنباً إلى جنب مع معلوماتها الرقمية المرتبطة بها. بالتالي تعد أنظمة GIS مناسبة لتمثيل نظم الإمداد بمياه الشرب، والشكل (1) يوضح شبكة مياه الشرب لمدينة جبلة بعد إنشائها ضمن برنامج GIS. والذي تم الحصول عليه بتطبيق الخطوات السابقة.

حساب الغزارات المطلوبة في العقد تم باتباع الخطوات التالية:

- ✓ تحويل طبقة الأبنية إلى ملف shape من النوع polygon في ArcMap.
- ✓ افتراض استهلاك الفرد من المياه 250 l/day اعتماد على القيمة المعطاة من وحدة مياه مدينة جبلة.
- ✓ حساب مساحة الأبنية الكلية من خلال calculate geometry.
- ✓ ادخال عدد الطوابق لكل حي على حدا.
- ✓ ضرب عدد الطوابق لكل الحي بمساحة الأبنية فيه لينتج المساحة الأفقية الكلية لجميع الطوابق وحساب مساحة كل حي على حدا من خلال الأمر summary.
- ✓ حساب نسبة مساحة كل مبنى من مساحة الحي وضرب هذه النسبة بعدد السكان للحي لينتج عدد السكان في كل بناء.
- ✓ ضرب عدد السكان بغزارة الفرد المفروضة وهي 250 l/day ويتم تشغيل الشبكة ويتم التحليل الهيدروليكي باستخدام EPANET مع كل بارامترات الإدخال المتوفرة للتحقق من النتائج بمقارنتها مع المعايير.

قمنا بهيكلية الشبكة الأصلية إلى الشبكة الرئيسية الشجرية حيث تعرف الهيكلية **skeletonization** بأنها عملية الاختيار التي تضمن إدراج أجزاء من الشبكة الهيدروليكية في النموذج والتي لها تأثير واضح على سلوك النظام. لإن محاولة تضمين كل خدمة فردية، أو صمام بوابة أو كل مكون من النظام الكبير في النموذج قد يكون مهمة ضخمة من دون الأخذ بالاعتبار التأثير المهم على نتائج النموذج. كذلك سوف يؤدي احتواء كل عنصر في النظام إلى كمية هائلة من البيانات، كافية لجعل إدارة واستعمال واستكشاف الأخطاء في النظام وإصلاحها مهمة مجهددة ومعرضة للخطر. لذلك تعد الهيكلية منهجاً عملياً للنمذجة التي تسمح للنموذج بإنتاج نتائج دقيقة وموثوقة من دون الاستهلاك الزائد للمال والوقت. لا توجد معايير مطلقة من أجل تحديد فيما إذا كان سيتم احتواء الأنابيب أم لا، لكن من الأمن القول إن كل النماذج هي على الأغلب هيكلية إلى حد ما. تتألف الشبكة الأصلية من 1647 أنبوب و1640 عقدة، تعد هذه الأعداد كبيرة جداً عند التعامل مع مشاكل النمذجة والتحسين عبر استعمال مزايا EPANET. يعطي تخفيض حجم الشبكة من دون التأثير على أدائها نتائج تحسين جيدة، لذلك بسطت الشبكة الأصلية إلى الشبكة الرئيسية الشجرية حيث تم الاعتماد على الأقطار الرئيسية الكبيرة ولذلك جميع الأنابيب ذوات الأقطار الصغيرة تم تجميع غزارتها إلى عقدة أساسية متواجدة على القطر الرئيسي بعد ذلك تم تجميع مجموعة من العقد الأساسية لتصبح بداية الخط المركزي ونهايته، أما الشبكة المغلقة والتي حصلنا عليها بعد وصل الأنابيب الطرفية فأصبحت تتكون من (77 أنبوب و68 عقدة).



الشكل (1) النموذج الرقمي لشبكة مياه جبلة في برنامج ArcMap

صياغة نموذج الأمثلة لتصميم شبكة توزيع المياه:

تبرز قضية تصميم شبكة الأنابيب على أنها المسألة الكلاسيكية التي يتم البحث فيها لتصميم شبكات توزيع المياه نظراً لأنها تشكل محور الكلفة الرئيسية حيث يهدف تحسين شبكة توزيع المياه إلى إيجاد أقطار الأنابيب الأمثل في الشبكة

من أجل التخطيط ومتطلبات الاحتياج. حيث أن تحديد أقطار الأنابيب المثلى في الشبكة النهائية مع تلبية شروط حفظ الكتلة والطاقة، (على سبيل المثال الشروط الهيدروليكية وقيود التصميم). ودالة الهدف هي التكلفة الإجمالية C_T لشبكة معينة يعطى بالعلاقة:

$$C_T = \sum_i^N C_i(D_i) * L_i \quad (1)$$

حيث: N هو العدد الإجمالي للأنابيب، $C_i(D_i)$ تكلفة الأنابيب i بقطر D_i لكل وحدة طول و L_i هو طول الأنابيب i . ويتميز التقليل من التكاليف المترتبة على الشبكة عن طريق الحفاظ على الكتلة والطاقة. قانون مصونه حفظ الكتلة ينص على أن التصريف الداخل في كل عقدة يجب أن يكون مساوياً للتصريف الخارج منها، باستثناء عقد التخزين (الأحواض والخزانات). لعدد من العقد M في الشبكة، ويمكن كتابة هذا القيد بالشكل:

$$\sum_J^M Q_J = 0 \quad (2)$$

حيث Q_J يمثل التصريف الداخل أو الخارج من العقدة J . أما قانون حفظ الطاقة فينص على أن إجمالي ضياعات الضاغط حول أي حلقة مساوياً للصفر أو الطاقة التي يتلقاها من المضخة E_p إذا لم يكن هناك ضخ يكتب القيد بالشكل:

$$\sum h_f = E_p \quad (3)$$

حيث h_f هو ضياع الضاغط بسبب الاحتكاك في الأنابيب والضياعات المحلية. وقد وضعت نماذج مختلفة لصيغة ضياعات الضاغط في العمليات الحسابية لتدفقات الأنابيب العملية. في هذه الدراسة، ضياع الضاغط h_f يعبر عنه في الأنابيب بصيغة Hazen-Williams التالية:

$$h_f = \frac{10.6744 * L_i * Q_i^{1.852}}{C_i^{1.852} * D_i^{4.8704}} \quad (4)$$

حيث Q_i هو تدفق المياه في الأنابيب (m^3/s) ، C_i هو معامل Hazen-Williams ، و D_i أقطار الأنابيب (m) ، و L_i هو طول الأنابيب (m) .

يجب أن تكون دالة الهدف بالحد الأدنى مع تحقق قيود التصميم والقيود الهيدروليكية. قيود التصميم (حدود قطر الأنابيب (الحد الأقصى والحد الأدنى) والقيود الهيدروليكية (حدود ارتفاع الضاغط في كل عقدة) وترد على التوالي على النحو التالي:

$$D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max} \quad \text{حيث } i=1, \dots, N \quad (5)$$

$$H_{J, \min} \leq H_J \leq H_{J, \max} \quad \text{حيث } J=1, \dots, M \quad (6)$$

حيث H_J هو ارتفاع الضاغط على العقدة J ، $H_{J, \min}$ ، $H_{J, \max}$ هي الحد الأدنى والحد الأقصى المسموح به لارتفاع الضاغط في هذه العقدة.

يتم وضع هذه القيود استكمالاً للشروط الهيدروليكية وهذه القيود الإضافية تقوم بإبعاد الحلول غير العملية وتحقق انخفاضاً بأبعاد الأنابيب غير القادرة على التزويد بالضغوط المطلوب أو غير المتوفرة تجارياً ليتم استبعادها من الحلول الممكنة [11].

الخوارزمية الجينية Genetic Algorithm (GA)

تعتمد الخوارزمية الجينية Genetic algorithm (GA) على نظرية داروين التطورية والتي تقوم بمبادئها الأساسية على التطور والتنوع في الحياة. تم استخدام نموذج تطوري مبسط من أجل الوصول إلى استخلاص حلول جيدة بالإضافة إلى تحديد الحلول للمسائل عالية التعقيد والتي لا يمكن لنا حلها بالوسائل الكلاسيكية. تم اعداد هذا النموذج للمرة الأولى من قبل HOLLAND JH [12] ومن ثم تم تطويره من قبل GOLDBERG DE [13].

تدمج الخوارزمية الجينية بين الأفكار مثل التعداد السكاني الناتج عن الحلول المتعددة للمسألة المدروسة، النجاة وإعادة البناء للحلول الأنسب (حيث ترتبط قيمة الأنسب بقيم التتابع الأهداف)، يتم توريث المواد الجينية للحلول الأبناء وذلك من الآباء اعتماداً على عملية التصالب Crossover Operation والطفرات mutations والتي تسبب تحركات عرضية ضمن فضاء الحل وبالتالي تجاوز الشروط المحلية. تحكم معاملات النقل بقواعد احتمالية أكثر من القواعد التحديدية. على الرغم من أن الخوارزميات الجينية تعتمد على ميكانيكية عشوائية لإجراء محاكاتها إلا أنها غير عشوائية عند الضغط من أجل تطوير لياقتها.

تمثل الطفرات عنصر البحث العشوائي الصغير والضروري للخوارزمية الجينية. ينطلق البحث في الخوارزميات التقليدية من نقطة وحيدة، في حين يبدأ البحث في الخوارزمية الجينية من كامل التعداد السكاني لجميع النقاط وتكون قادرة على الصعود على قمم مختلفة بشكل متوازٍ، وهو ما يعرف بالبحث متعدد النماذج multimodal search. إذا كان لدينا معلومات مسبقاً لفضاء الحل عندها يمكن لنا أن نقترح حلول بذرية seed solutions من أجل دعم البحث. يجب أن يتم توصيف الحلول برموز منتهية وذلك لكي نكون قادرين على استخدام الخوارزمية الجينية (عادة قيم مرمزة بصورة ثنائية) وهي ما تعرف بالصبغيات Chromosome، تتألف من تتابع خطي من الجينات بحيث يكون لقيمة الجين وموقعه معنىً يعبر عنه. وهو شبيه بالصبغيات الموجودة في بنية DNA الخاص بالإنسان.

يمثل كل صبغي موقعاً ممكناً ضمن فضاء الحل المتعدد الأبعاد. قد يمثل الصبغي مجموعة من قيم متحولات القرار كأحجام الأنابيب والتي تطلب التحقيق المثالي، تتمتع الخوارزمية الجينية بقابليتها للتطبيق والاستخدام في مجال واسع من المسائل.

تعتمد هذه الخوارزمية على تعداد سكاني ذو حجم متوسط، احتمالية تصالب مرتفعة، واحتمالية طفرات مختلفة، إلا أنها قد تكون ذات حساسية منخفضة لقيم الاحتمالية الحقيقية التي تم إضافتها. القيم العملية للتعداد السكاني المعتمد يتراوح بين 50 و1000 وهذا يعتمد على حجم فضاء الحل والتعقيد الحسابي لتابع اللياقة المحسوب [14]. يتم اختيار الأفراد هنا بحيث تتطابق اعتماداً على توابع لياقتها. إحدى طرق الاختيار المعتادة طريقة fitness-proportionate selection حيث يتم اختيار الأفراد بعدد من المرات متناسبة مع معدل لياقتها مع اللياقة الكلية الموجودة في التعداد السكاني. قد تتم هذه العملية اعتماداً على ما يعرف باسم roulette-wheel selection، حيث تقوم بالاختيار في كل اختيار مقطوعاً من عملية محاكاة لدولاب الروليت حيث يعتمد حجم المقطع على لياقته وبالتالي فإن العناصر ذات اللياقة الأعلى سيكون لديها احتمالية أعلى للاختيار عند توقف العجلة، نعرف Selection pressure على أنها

الاحتمالية لاختيار الحل الأفضل عند إعادة التوالد للجيل التالي ومن أجل تجنب التقارب السابق لأوانه يجب أن تكون هذه العملية بمقدار الضعف احتمالياً لاختيار الحل ذو القيمة المتوسطة للياقة. ميكانيكية اختيار أخرى تسمى Binary tournament selection حيث يتم اختيار حلين من التعداد السكاني بشكل عشوائي ويتم اختيار الأكثر لياقة منها كأباء. تعطي هذه الطريقة اختياراً أكثر مناسبة من عجلة الروليت [15].

تستخدم الخوارزمية الجينية عادة القيود الناعمة soft constraints على شكل تابع لياقة penalty terms وذلك لمحاكاة المستويات غير المناسبة للخدمة (قيم ضغط منخفضة على سبيل المثال) أو اجتياز القيود القاسية المحددة للنظام. قد يقود ذلك إلى حل غير قابل للتطبيق لأن يكون جزءاً من التعداد، يضمن الشرط الجزائي امتلاكها للياقة أقل من العناصر ذات الحل القابل للتطبيق، يمكن تطبيق طريقة أخرى بأن نجعل الشروط الجزائية متدرجة كتابع للمسافة واللياقة. يمكن الوصول إلى ذلك عن طريق إضافة الخطأ التربيعي إلى تابع اللياقة الأساسي. يتم استخدام penalty multiplier من أجل ضبط القيم الجزائية ضمن نفس المجال الخاص باللياقة الأساسية. كما تستخدم طريقة repair operator والتي تحاول إصلاح الحلول غير القابلة للتطبيق. يحتاج ذلك إلى معلومات تجريبية ضمن نطاق المسألة المدروسة [16].

تحدث عملية التكاثر كنسخ مباشر للحل على شكل أجيال متتالية أو عملية التصلب الصبغي chromosome crossover، بصورة مشابهة لكيفية تغيير أزواج الصبغيات ضمن المواد الجينية، الاحتفاظ بالقسم الأول من الصبغي واستبدال القسم الثاني بين الاثنين. تولد هذه العملية زوج من الصبغيات الجديدة، يجب أن تتم عملية التصلب دائماً باحتمالية تتراوح بين (0.5-1)، تتم عملية التصلب عن طريق تقسيم الصبغيات عند نقطة محددة يتم اختيارها باستخدام نوع من التوزيع الاحتمالي. تلعب الطفرات المهمة الثانوية في عملية التكاثر ولا تمثل القوة المسيطرة كما كان يعتقد سابقاً، تقوم الطفرة بعملية تبديل الجينات (تسلسل البتات الخاص بالمحارف) مع احتمالية منخفضة وتقوم بتوليد التعددية المطلوبة. إذا كانت احتمالية الطفرات عالية جداً تتحول الخوارزمية إلى عملية بحث عشوائي والتي تعتبر عملية غير مرغوبة. إن تغيير الترددات لقيم الجينات المحددة (في مجال علوم الوراثة) في التعداد السكاني يعود بشكل رئيسي للطفرات العشوائية والتي تسمى أيضاً بالإزاحة الجينية والتي في حال كونها مفرطة فإنها تعتبر مسببة لانحلال الصنف. تعتبر الطفرة مناسبة بمقدار طفرة واحدة لكل تبديل لألف من البتات وهي قيمة موافقة لما هو موجود في الطبيعة. تحدد الاحتمالية الطبيعية للطفرة بين (0.01 إلى 0.001). تقدم دراسات أخرى على أن تكون احتمالية الطفرة متناسبة عكسياً مع التعداد السكاني N بحيث تحقق $(0.1/N < pm < 5/N)$. يجب أن تسمح الطفرات أيضاً بالوصول إلى أي حل وذلك اعتماداً على حل آخر (حتى ولو كانت الاحتمالية ضئيلة جداً) وذلك لضمان تغطية كامل مجال المعالجة اللانهائي، يمكن أن تتوقف الخوارزمية الجينية عن العمل بعد عدد محدد من الدورات (الأجيال) أو عند ثبات تابع اللياقة العام للتعداد السكاني ضمن مجال محدد من الأجيال المتلاحقة [13].

تعتبر الخوارزمية الجينية ضعيفة أمام الخوارزميات الأخرى من ناحية الدقة والسرعة حيث تعتبر هذه الخوارزمية مكلفة حسابياً اعتماداً على التطبيق المعتمد، وينتج التعداد السكاني ليصبح أكثر بطئاً في حال توجه البحث إلى الحل المثالي. تقوم الخوارزمية الجينية بحساب قيمة التابع الهدف لكل حل يتم توليده حيث تولد تعداداً سكانياً من الحلول المتاحة وتستخدم من أجل التحليل متعدد الأهداف والتي يتطلب العديد من الحلول البديلة كما أنها تستطيع التعامل مع مسائل شبكات توزيع المياه من دون تشويه أو تبسيط المسألة. لا تحتاج الخوارزمية الجينية إلا القليل من المعلومات

حول المسألة (يكفيها تابع اللياقة) كما تتمتع بكونها مناسبة وذات حلول مستقرة وتعطي حلولاً مناسبة حتى في المسائل العالية اللاخطية والتي تمتلك أكثر من قيمة مثالية، انقطاعات وتوابع غير قابلة للتفاضل. يمكن للخوارزمية الجينية القيام ببحث شامل لكامل مجال الحل والقدرة على الوصول إلى المثالية المناسبة لكامل النظام ولذلك تعتبر الخوارزمية الجينية مثالية ضمن مجال شبكات توزيع المياه [17]. تم استخدام الخوارزمية الجينية بنجاح في العديد من الدراسات [18-22]. ويوضح الشكل (2) خطوات عمل الخوارزمية الجينية GA.

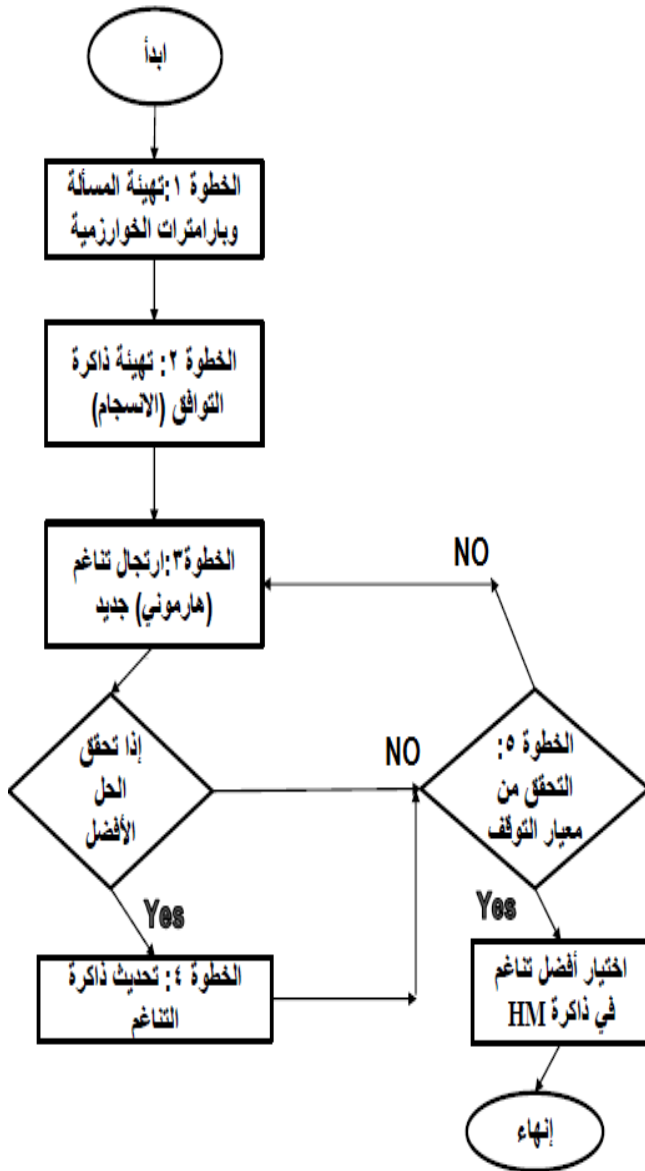
خوارزمية البحث المتناغم: (HS) (Harmony Search Algorithm)

تعرف هذه الخوارزمية بأنها خوارزمية تطويرية تقلد سلوك الموسيقيين من ناحية العشوائية في الأداء المعتمد على الذاكرة في عملية التغيير في النغمات عند القيام بالارتجال في الأداء، وتبدأ هذه الخوارزمية بشكل رئيسي بتوليد مجموعة قيم عشوائية والتي تقترض بأنها حلول منطقية للقضية المدروسة. ويقوم معامل اللياقة fitness من أجل كل قيمة اعتماداً على تابع تقييم محدد evaluation function. كما يجب إجراء عملية ترشيح في كل دورة من أجل توليد التعداد السكاني (العينات) المناسب. الهدف الرئيسي من عملية الترشيح هو ضبط مجال البحث لقيم أكثر دقة ومن ثم الحصول على هذه القيم لتمريرها إلى التعداد السكاني التالي [23].

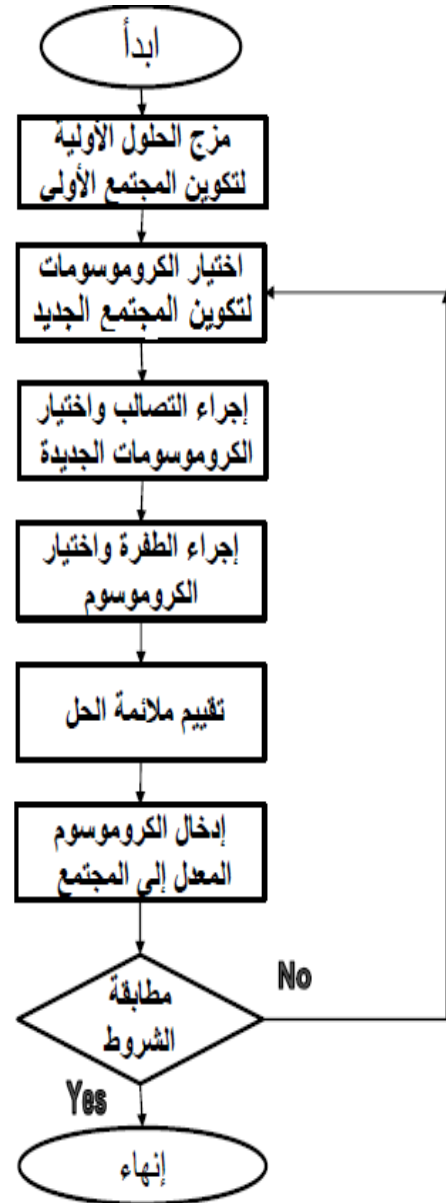
تستخدم خوارزمية HS في العديد من المجالات وذلك لمزاياها المتعددة كحاجتها لعمليات رياضية أقل من الخوارزميات التقليدية، كما أنها لا تحتاج إلى مقدار مبدئي من البحث المتسلسل وذلك لاختيار المتحولات. بالإضافة لما سبق لا تحتاج إلى أخذ القيم المستمدة بعين الاعتبار نظراً لاستخدامها خوارزميات البحث العشوائي.

يمكننا تمثيل التشابه الرئيسي بين خوارزمية HS وطريقة بناء الانسجام الموسيقي بشكل ارتجالي بما يلي: أولاً، يقوم الموسيقي بالبحث عن الانسجام الموسيقي الأفضل (الحالة الأولية) وذلك ضمن معيار محدد من النغمات المعروفة في حين تبحث خوارزمية HS عن الحل العام المناسب للتابع الهدف. ثانياً، كل نغمة تنتج من الأدوات الموسيقية يجب أن تتوافق مع الانسجام الموسيقي ككل وجمال النغمات، وهو ما يشابه قيمة التابع الهدف المحدد من قبل دمج القيم المعينة لكل متحول قرار [24-25].

تستخدم HS عمليات مماثلة لتلك المستخدمة في خوارزميات الأدلة العليا meta-heuristic جميعها، على سبيل المثال تقوم بالحفاظ على بيانات الأشعة الموجودة سابقاً ضمن ذاكرة الانسجام (HM) Harmony memory. وهي متوافقة مع ذاكرة خوارزمية البحث المعتمدة من قبل Tabu. كما تستطيع خوارزمية HS تحويل وتغيير القيم في الـ HMCR (HS memory-accepting rate) ضمن كامل العملية الحسابية. وكما في SA، تأخذ HS جميع الحلول بعين الاعتبار كما هو الأمر بالنسبة للخوارزميات الجينية. الفرق الرئيسي بين HS و GA هو أن الأخيرة تولد حلول جديدة اعتماداً على الحلول السابقة (والتي تدعى بالآباء)، في حين تأخذ خوارزمية HS جميع الحلول السابقة قبل توليد شعاع التناغم الجديد.



الشكل (3) مخطط خوارزمية البحث المتناغم HS



الشكل (2) مخطط الخوارزمية الجينية GA

تتألف خوارزمية HS من خمس خطوات رئيسية:

- تأهيل وإعداد القيم الابتدائية لمتحولات HS (HMCR, BW, PAR) : (pitch adjustment rate) (bandwidth) (HS memory-accepting rate) وعدد الدورات NI ، يتم في هذه المرحلة ضبط الهدف بالنسبة لكامل العملية إما باستخدام تابع الاختبار الموضوعي maximum or minimum والذي يتضمن الحلول الممكنة. $f(x_i)$
- يتم إعداد قيم HM مثل x_i ضمن مجالات الحدود الدنيا والعليا.
- تطوير الانسجام الجديد الناتج وذلك باستخدام ثلاث محددات HMCR, PAR, BW، يتضمن هذا التطوير خطوتين رئيسيتين، في البداية إعداد قيمتين عشوائيتين a, b محصورة بين 0-1، بعد ذلك إذا كان $a > HMCR$ عندها

يتم توليد القيمة الجديدة x_i وبالتالي توليد شعاع جديد x'_j . الحالة الثانية إذا كان $a < HMCR$ عندها سنختار القيمة العشوائية من $HM(x_i)$ وإذا كانت القيمة $b < PAR$ عندها سيتم تعديل x_i باستخدام المعادلة التالية:

$$x'_j = x_{newj} \mp bw * rand$$

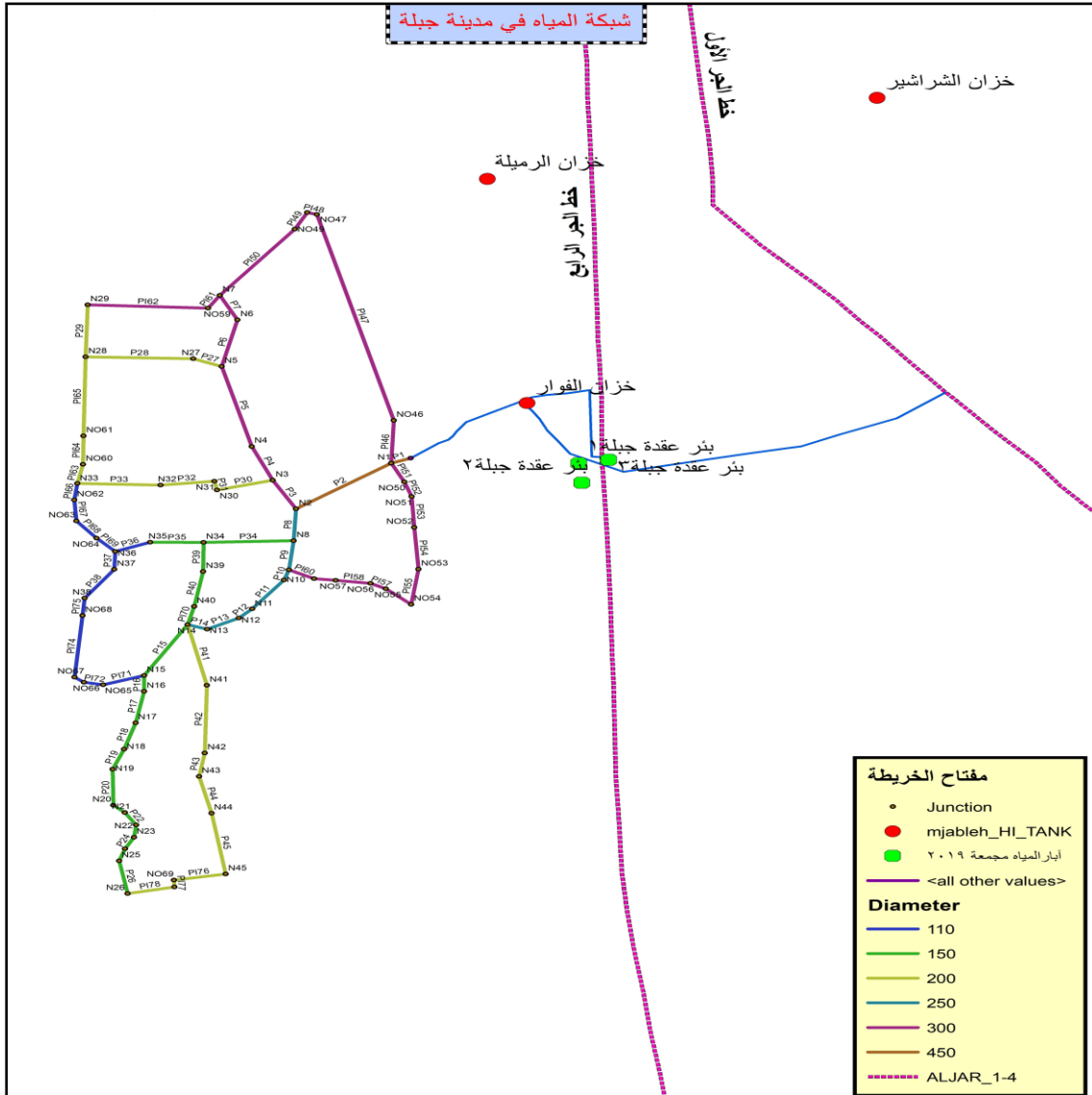
- يتم تحديث الذاكرة إذا كان الحل الجديد الناتج من الخطوة السابقة x'_j أفضل من أسوأ حل في HM وذلك اعتماداً على التابع الموضوعي.
- بعد كل تعديل، سنتفحص الخوارزمية شرط التوقف كالعدد الأعظمي من التطويرات من أجل إنهاء عملية البحث، يوضح الشكل (3) خطوات عمل خوارزمية البحث التوافقي HS.

النتائج والمناقشة:

التحليل الهيدروليكي لشبكة توزيع المياه لمدينة جبلة تم باستخدام برنامج Epanet وتم حساب الكلفة التصميمية للشبكة بوضعها الحالي بعد تحويلها لمغلقة، ثم تمت أمثلة الكلفة لهذه الشبكة بالخوارزمية الجينية باستخدام برنامج WATERGEMS وبتقنية البحث التوافقي باستخدام برنامج HSNET. تم تحويل الشبكة إلى شبكة مغلقة بإيصال نهايات الشبكة الشجرية ببعضها وإجراء هيكلية للشبكة الحقيقية لتحويلها إلى نموذج هيدروليكي وفق ما هو موضح بالشكل (4). تم إجراء التحليل الهيدروليكي للشبكة المغلقة على برنامج (EPANET) فنجد أن 75% من السرعات في هذه الأنابيب ضمن الحدود المسموحة و فقط 7% أقل من 0.5 m/s و 18% أكبر من 2 m/s، وتوزعت الضغوط في عقد الشبكة حوالي 30% بين 25 m و 35 m وهي ضمن الضغوط المطلوبة لمدينة جبلة تبعاً لعدد الطوابق المتوفر في المدينة والذي لا يتجاوز ستة طوابق في جميع الأحياء أما 70% منها فتجاوزت هذه القيم ووصلت لحوالي 60 m وتعتبر أعلى من الحد المسموح في الكودات. بعد ذلك تم إيجاد الحل الأمثل لتصميم هذه الشبكة اعتماداً على الخوارزمية الجينية بواسطة برنامج WATERGEMS بعد أن قمنا بتحديد بارامترات الأمثلة لهذه الشبكة. الجدول (1) يوضح بارامترات الأمثلة للخوارزمية الجينية التي تم استخدامها في عملية البحث. تم إجراء التحليل الهيدروليكي للشبكة على برنامج (WATERGEMS) فنجد أن 82% من السرعات في هذه الأنابيب ضمن الحدود المسموحة و فقط 5% أقل من 0.5 m/s و 13% أكبر من 2 m/s، وتوزعت الضغوط في جميع عقد الشبكة بين 26 m و 46 m وجميعها ضمن الضغوط المطلوبة والمسموحة لمدينة جبلة.

الجدول (1) بارامترات الأمثلة للخوارزمية الجينية

Population size	150	Cut probability	1.7%
Number of generations	50	Penalty factor	1000000
Mutation rate	1.5%	Splice probability	60%
Random seed	0.6	Maximum Era Number	6



الشكل (4) مخطط شبكة مياه مدينة جبلة المغلقة

ويبين الشكل (5) تفاصيل أقطار الأنابيب ونوع المادة المصنوعة منها وكذلك معامل (H-W) ووحدة الكلفة لكل قطر والذي تم استخدامها في عملية البحث.

Material	Diameter (mm)	Hazen Williams C Factor	Unit Cost (m, \$/m)
Cast iron	110.0	130.0	23,500.00
Cast iron	150.0	130.0	32,500.00
Cast iron	200.0	130.0	43,750.00
Cast iron	250.0	130.0	54,375.00
Cast iron	300.0	130.0	67,500.00
Cast iron	450.0	130.0	87,500.00

الشكل (5) تفاصيل أقطار الأنابيب ونوع المادة المصنوعة منها وكذلك معامل (H-W) ووحدة الكلفة لكل قطر

قيم الحدود التي تم ضبطها للمحددات بالنسبة للسرعة والضغط في عملية البحث موضحة بالجدول (2).

الجدول (2) قيم الحدود التي تم ضبطها للمحددات بالنسبة للسرعة والضغط في عملية البحث

Max pressure = 5	Max velocity = 2
Min pressure = 2	Min velocity = 0.5

أيضاً تم إيجاد الحل الأمثل لتصميم هذه الشبكة اعتماداً على خوارزمية البحث المتناغم بواسطة برنامج HSNET بعد أن قمنا بتحديد بارامترات الأمثلة لهذه الشبكة. الجدول (3) يوضح بارامترات الأمثلة لخوارزمية البحث المتناغم التي تم استخدامها في عملية البحث.

تم إجراء التحليل الهيدروليكي للتصميم الناتج عن برنامج (HSNET) نجد أن 80% من السرعات في هذه الأنابيب ضمن الحدود المسموحة فقط 5% أقل من 0.5 m/s و 15% أكبر من 2 m/s، وتوزعت الضغوط في جميع عقد الشبكة بين 30 m و 46 m وجميعها ضمن الضغوط المطلوبة والمسموحة لمدينة جبلة.

الجدول (3) بارامترات HS

HMS	5	ECR	0.001
HMCR	0.95	Min heads	4
PAR	0.25	MaxIter	3000

الجدول (4) يوضح توزيع السرعة في أنابيب الشبكة المغلقة لمياه مدينة جبلة مع أقطارها وأطوالها بعد تحويلها لمغلقة باستخدام Epanet و WATERGEMS و HSNET.

الجدول (4) يوضح توزيع السرعات في أنابيب الشبكة المغلقة لمياه مدينة جبلة مع أقطارها وأطوالها بعد تحويلها لمغلقة باستخدام

.HSNET و WATERGEMS و Epanet

ID	L(m)	Epanet		GA		HS	
		D(mm)	V(m/s)	D(mm)	V(m/s)	D(mm)	V(m/s)
Pi65	447.50	200	0.79	150	1.05	110	1.43
Pi64	160.79	200	0.79	150	1.05	110	1.43
Pi63	109.65	200	0.68	150	0.90	110	1.23
Pi68	127.33	110	2.00	110	2.00	110	2.00
Pi69	105.78	110	1.86	110	1.86	110	1.86
P37	101.10	110	2.00	110	2.00	110	2.00
P38	202.29	110	0.77	110	0.77	110	0.77
Pi75	99.16	110	0.77	110	0.77	110	0.77
Pi74	349.68	110	0.30	110	0.30	110	0.30
Pi73	47.01	110	0.77	110	0.77	110	0.77
Pi72	79.57	110	0.77	110	0.77	110	0.77
Pi71	174.15	110	1.01	110	1.01	110	1.01
P16	89.51	150	1.11	110	1.51	110	1.51
P17	181.46	150	1.08	110	1.47	110	1.47
P15	337.64	150	1.86	110	2.53	110	2.53
Pi70	106.44	150	0.88	110	1.20	110	1.20
P40	200.34	150	0.64	110	0.87	110	0.87
P39	164.22	150	0.64	110	0.87	110	0.87
P2	463.49	450	1.43	300	2.15	110	2.15
Pi51	118.66	300	1.30	250	1.56	200	1.95
Pi52	87.46	300	1.30	250	1.56	200	1.95
Pi54	236.62	300	1.30	250	1.56	200	1.95
Pi55	200.92	300	1.22	250	1.46	200	1.83
Pi56	135.95	300	1.21	250	1.45	200	1.82
Pi57	69.17	300	1.16	250	1.39	200	1.74
Pi58	141.53	300	1.16	250	1.39	200	1.74
Pi59	88.53	300	1.13	250	1.36	200	1.70
Pi60	113.18	300	1.13	250	1.36	200	1.70
P9	165.98	250	1.36	300	1.13	200	1.69
P8	180.15	250	2.35	300	1.95	300	1.95
P10	60.57	250	2.77	300	2.30	300	2.30
P11	207.60	250	2.75	300	2.28	300	2.28
P12	75.54	250	2.75	300	2.28	300	2.28
P13	143.51	250	2.61	300	2.17	300	2.17
P14	82.59	250	2.61	300	2.17	300	2.17
P34	365.37	150	2.75	250	1.65	200	2.06
P3	187.31	300	1.41	250	1.69	200	2.12
P4	209.42	300	0.79	250	0.95	200	1.19

P5	467.71	300	0.79	250	0.95	200	1.19
P27	123.99	200	1.04	110	1.88	110	1.88
P28	435.96	200	0.79	110	1.43	110	1.43
P35	216.09	150	1.46	110	1.99	110	1.99
P36	151.66	110	0.23	110	0.23	110	0.23
P30	232.84	200	1.33	150	1.77	150	1.77
P31	50.84	200	1.29	150	1.72	150	1.72
P32	219.28	200	1.20	150	1.60	150	1.60
P33	337.29	200	1.03	150	1.86	150	1.86
Pi66	94.63	110	2.09	110	2.09	110	2.09
Pi67	119.36	110	2.09	110	2.09	110	2.09
P41	351.78	200	1.32	150	1.76	150	1.76
P42	382.76	200	1.29	150	1.72	150	1.72
P43	134.64	200	1.29	150	1.72	150	1.72
P44	213.27	200	1.29	150	1.72	150	1.72
P45	348.57	200	1.21	150	1.61	150	1.61
Pi76	212.00	200	1.17	150	1.56	150	1.56
Pi77	39.21	200	1.17	150	1.56	150	1.56
Pi78	193.08	200	1.17	150	1.56	150	1.56
P26	188.04	150	0.60	110	0.82	110	0.82
P25	72.75	150	0.60	110	0.82	110	0.82
P24	74.34	150	0.60	110	0.82	110	0.82
P23	70.02	150	0.60	110	0.82	110	0.82
P22	84.54	150	0.80	110	1.09	110	1.09
P21	61.47	150	0.80	110	1.09	110	1.09
P20	203.32	150	0.80	110	1.09	110	1.09
P19	123.15	150	0.80	110	1.09	110	1.09
P18	155.28	150	1.08	110	1.47	110	1.47
P29	294.05	200	1.02	110	1.85	110	1.85
Pi62	487.97	300	0.49	150	0.98	110	1.33
Pi61	86.97	300	0.51	150	0.77	110	1.04
P7	155.81	300	0.18	150	0.27	110	0.37
P6	272.03	300	0.18	150	0.27	110	0.37
Pi53	174.88	300	1.30	150	1.95	110	2.65
Pi46	242.51	300	0.81	150	1.22	110	1.65
Pi47	1204.46	300	0.81	150	1.22	110	1.65
Pi48	41.51	300	0.79	150	1.19	110	1.61
Pi49	106.11	300	0.78	150	1.17	110	1.59
PI50	482.32	300	0.76	150	1.14	110	1.55

الجدول (5) يوضح الكلفة الإجمالية لشبكة مياه مدينة جبلة بعد تحويلها لمغلقة باستخدام Epanet و WATERGEMS و HSNET.

الجدول (5) الكشف التقديري لشبكة مياه مدينة جبلة المغلقة باستخدام Epanet و WATERGEMS و HSNET

القطر mm	الكلفة (ل.س./ م. ط)	الكمية Epanet م. ط	الكلفة Epanet ل. س	الكمية GA م. ط	الكلفة GA ل. س	الكمية HS م. ط	الكلفة HS ل. س
450	87500	463.5	40556250	0	0	0	0
300	67500	5311	358492500	1379.5	93116250	750	50625000
250	54375	916	49807500	2422	131696250	0	0
200	43750	4287.5	187578125	0	0	2588	113225000
150	32500	2694	87555000	6688	217360000	2716	88270000
110	23500	1652	38822000	4835	113622500	9270	217845000
			762811375		555795000		469965000

بالنظر إلى الجدول (5) نجد أن أقطار الأنابيب المصممة اعتماداً على تقنية البحث التوافقي أصغر وبالتالي التكلفة أقل. وأظهرت النتائج القدرة الكبيرة لأساليب (meta-heuristic) حيث أن كلفة التصميم تناقصت بمقدار 28% و 37% باستخدام الخوارزمية الجينية وتقنية البحث المتناغم على التوالي. وبالإضافة إلى ذلك وجدنا أن تقنية البحث التوافقي كانت أكثر كفاءة وسرعة من الخوارزمية الجينية.

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث تقييم فعالية وكفاءة اثنين من أساليب (meta-heuristic) وهما الخوارزمية الجينية وتقنية البحث المتناغم لأمتة شبكة توزيع المياه لمدينة جبلة. واعتماداً على النتائج التي تم الحصول عليها فكلتا الطريقتين لديها كفاءة جيدة لإنقاص كلفة التصميم لشبكات مياه الشرب عموماً. وتلخصت النتائج بما يلي:

- ☒ كلفة التصميم تناقصت بمقدار 28% و 37% باستخدام الخوارزمية الجينية وتقنية البحث المتناغم على التوالي.
- ☒ الخوارزمية الجينية وتقنية البحث المتناغم فعالتان في تقليل كلفة تصميم أنابيب مياه الشرب لمدينة جبلة.
- ☒ تقنية البحث المتناغم كانت أكثر كفاءة وسرعة من الخوارزمية الجينية.
- ☒ يجب تطبيق خوارزميات أخرى مثل مستعمرة النمل وبحث تابو وغيرها من تقنيات (meta-heuristic) على تصميم شبكات المياه والمقارنة فيما بينها وإيجاد الأفضل.
- ☒ دراسة موثوقة الشبكة وكذلك جودة المياه ضمنها وادخالها كتوابع هدف مع تابع الكلفة.
- ☒ لذلك يوصى باعتماد طرائق الأمثلة لتصميم شبكات مياه الشرب في الأعمال المستقبلية.

References:

1. KESSLER, A.; SHAMIR, U. *Analysis of the linear programming gradient method for optimal design of water*. Water Resource, 1989, 1469–1480.
2. SCHAAKE, J. C.; LAI, F. H. *Linear Programming and Dynamic Programming Application to Water Distribution Network Design*. MIT Hydrodynamics Laboratory., Cambridge, MA, USA, 1969..
3. BRACKEN, J.; MCCORMICK, G. P. *elected Applications of Nonlinear Programming. Research Analysis Corp.*. Mclean, VA, USA, 1968..
4. GEEM, Z. W. *Optimal cost design of water distribution networks using harmony search*. Eng. Optim, 2006, 259–277.
5. GOLDBERG, D. E.; KUO, C. H. *Genetic algorithms in pipeline optimization.. J. Comput. Civ. Eng*, 1997, 128–141.
6. SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. *Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks*. J. Water Res. Plan. Man, 1997, 67–77.
7. KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. *Optimization by simulated annealing*. Science, 1993, 671–680.
8. ZECCHIN, A. C.; MAIER, H. R.; SIMPSON, A. R.; LEONARD, M.; NIXON, J. B. *Ant colony optimization applied to water distribution system design: Comparative study of five algorithms*. J. Water Res. Plan. Man., 2007, 87–92.
9. GEEM, Z. W.; KIM, J. H.; LOGANATHAN, G. V. *A new heuristic optimization algorithm: Harmony search*. Simulation, 2001, 60–68.
10. GEEM, Z. W. *Harmony Search Optimizer for the Design of Water Distribution Networks (Ver 1.0)*. Environmental Planning & Management Program, 2007.
11. M. TABESH, M. Z. M. D. *The Least Cost Design of Water Distribution Networks Using Water Quality Constraints*. Journal of Water Sciences Research, 2015, 1-12.
12. HOLLAND JH. *Adaptation in natural and artificial systems*., University of Michigan Press, Ann Arbor (MI), 1975.
13. GOLDBERG DE, D. K. K. H. & H. G. *accurate optimisation of difficult problems using fast messy genetic algorithms*., University of Illinois, 1993.
14. K, D. *An efficient constraint handling method for genetic algorithms*., Technical Report, Kanpur Genetic Algorithms Laboratory; Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur., 1998.
15. GOLDBERG DE & KUO CH. *Genetic algorithms in pipeline optimisation*. Journal of Computing in Civil Engineering, 1987, 128–141.
16. AHN CW. *dvances in evolutionary algorithms: Theory, design and practice*., Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, Berlin., 2006.
17. WU ZY, W. T. M. R. T. H. H. G. & H. W. *Optimal capacity of water distribution systems*., Proceedings of the 1st Annual Environmental and Water Resources Systems Analysis Symposium, Roanoke (VA), 2002.
18. WU ZY, B. P. O. C. & R. J. *Using genetic algorithms to rehabilitate distribution systems*. Journal of the American Water Works Association, 2001, 74–85.
19. WU ZY & SIMPSON AR. *Competent genetic-evolutionary optimisation of water*

- distribution systems*. Journal of Computing in Civil Engineering, 2001, 90–101.
20. SIMPSON AR, D. G. & M. L. *Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimisation*. Journal of Water Resources Planning and Management, 1994, 423–443.
21. SAVIC DA & WALTERS GA. *Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, 1997, 67–77.
22. DANDY GC, S. A. & M. L. *An improved genetic algorithm for pipe network optimisation*. Water Resources Research, 1996, 449–458.
23. MAHDAVI, M. G. H. O. a. M. *Global-best harmony search*. Appl.Math. Comput., 2008, 643-656.
24. GEEM, K. S. L. a. Z. W. *new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: Harmony search theory and practice*. Comput. Methods Appl. Mech.Eng., 2005, 3902-3933.
25. GEEM., K. S. L. A. Z. W. *new structural optimization method based*. Comput.Struct., 2004, 781-798.