https://jsrhs.rcc.edu.ly/
ISSN: 3078-4611
Vol.3 No.2 (2026), 121- 137
Article history:
Received:04/10/2026
Accepted:05/11/2026
Published:08/11/2026

مجلة البحوث المستدامة في العلوم الإنسانية

JSRHS

حل مشكلة البائع المتجول باستخدام الخوارزمية الجينية: دراسة تطبيقية على دهانات المدينة مصراتة

مروة عبد المنعم البكوش[1*]
محاضر مساعد بكلية الاقتصاد والعلوم السياسية – جامعة مصراتة
https://orcid.org/0009-0002-5970-980X
m.albakoush@epsmisuratau.edu.ly

سناء أبوالقاسم أبوراوي[2*]
محاضر مساعد بكلية الاقتصاد والعلوم السياسية – جامعة مصراتة
https://orcid.org/0009-0004-2474-5151
S.abourawi@epsmisuratau.edu.ly

Solving the Traveling Salesman Problem Using Genetic Algorithm: An Applied Study on Almadina Misurata Paints

Marwa Abdulmonem Albakoush Sana Aboulqasim Abourawi

Abstract:
Operations research is considered one of the most important quantitative approaches that help organizations address complex problems through accurate solutions based on mathematical models and computational analysis. One of the most prominent and widely encountered problems in this field is the Traveling Salesman Problem (TSP), which aims to determine the shortest possible route that visits a set of locations exactly once before returning to the starting point. The complexity of this problem arises from the exponential growth in the number of possible routes as the number of locations increases, making it extremely difficult to obtain an optimal solution manually. In this context, this study aims to apply the Genetic Algorithm (GA), as one of the heuristic approaches, to address the Traveling Salesman Problem through a practical case study of Almadina Paints Company in Misrata. Location data were collected using Google Maps, and a distance matrix between the locations was constructed. Subsequently, the Solver tool in Microsoft Excel, using the Evolutionary solving method, was employed to identify a near-optimal route. The results revealed a reduction in the total route distance from 66.3 km under the current route to 48.6 km under the optimized route, representing a decrease of 17.7 km and an improvement rate of approximately 26.7%. This improvement demonstrates the role of the Genetic Algorithm in reducing travel distances, thereby contributing to lower operating costs, reduced fuel consumption, time savings, improved operational efficiency, and enhanced customer service. The study highlights the importance of employing heuristic algorithms within the framework of operations research to address routing problems in organizations. It also emphasizes the need to update location and distance data periodically to ensure the continued relevance of the proposed solutions. Furthermore, the proposed approach can be extended to address other operational problems, such as raw material distribution and transportation scheduling.
Keywords: Traveling Salesman Problem (TSP), Genetic Algorithm (GA), Almadina Misurata Paints.

الملخص:
تعد بحوث العمليات من أهم الأساليب الكمية التي تساعد المؤسسات على مواجهة المشكلات المعقدة عبر حلول دقيقة مبنية على النماذج الرياضية والتحليل الحاسوبي. ومن أبرز هذه المشكلات وأكثرها شيوعًا مشكلة البائع المتجول (Traveling Salesman Problem – TSP)، التي تهدف إلى إيجاد أقصر مسار يمر بمجموعة من المواقع مرة واحدة فقط قبل العودة إلى نقطة البداية. وتكمن صعوبة هذه المشكلة في النمو الأسي لعدد المسارات الممكنة مع زيادة عدد المواقع، مما يجعل الوصول إلى الحل الأمثل يدويًا أمرًا بالغ الصعوبة. في هذا السياق، تهدف هذه الدراسة إلى تطبيق الخوارزمية الجينية (Genetic Algorithm – GA) كأحد الأساليب الاسترشادية لمعالجة

مشكلة البائع المتجول في حالة عملية لدهانات المدينة مصراتة (Almadina Misurata Paints). وقد تم جمع بيانات المواقع باستخدام خرائطGoogle ، وإعداد مصفوفة المسافات بينها، ثم استخدام أداة Solver في برنامج Microsoft Excel عبر محرك الحل التطوري (Evolutionary Method)لتحديد المسار الأقرب إلى الأمثل .أظهرت النتائج انخفاض طول المسار الكلي من (66.3 كم) في المسار الحالي إلى (48.6 كم) في المسار المحسن، أي بانخفاض قدره (17.7 كم) وبنسبة تحسن بلغت نحو (26.7%). ويعكس هذا التحسن دور الخوارزمية الجينية في تقليل المسافة المقطوعة، بما يسهم في خفض التكاليف التشغيلية، تقليل استهلاك الوقود، وتوفير الوقت، الأمر الذي يعزز من كفاءة الأداء ويُحسن مستوى الخدمة المقدمة للعملاء. وتؤكد هذه الدراسة أهمية توظيف الخوارزميات الاسترشادية ضمن إطار بحوث العمليات لمعالجة مشكلات المسارات داخل المؤسسات، مع ضرورة تحديث بيانات المواقع والمسافات بصورة دورية لضمان استمرار ملاءمة الحلول المقترحة، وإمكانية توسيع نطاق التطبيق ليشمل مشكلات أخرى مثل توزيع المواد الخام أو جدولة عمليات النقل .
الكلمات المفتاحية: مشكلة البائع المتجول (TSP)، الخوارزمية الجينية (GA)، دهانات المدينة مصراتة.

1. المقدمة

تعد مشكلة البائع المتجول (Traveling Salesman Problem – TSP) من أبرز مسائل التحسين في مجال بحوث العمليات، حيث تتمثل فكرتها الأساسية في إيجاد أقصر مسار ممكن يمر بمجموعة من المدن أو المواقع، بحيث يتم زيارة كل موقع مرة واحدة فقط، مع العودة إلى نقطة البداية. وعلى الرغم من بساطة مفهوم المشكلة من الناحية النظرية، إلا إنها تصنف ضمن المشكلات المعقدة حسابيا (NP – Hard) نظرا لازدياد عدد المسارات الممكنة بشكل أُسِي مع زيادة عدد المواقع، الأمر الذي يجعل الوصول إلى الحل الأمثل يدويا أو باستخدام الأساليب التقليدية أمرا بالغ الصعوبة (Dantzig et al., 1954).

وقد حظيت مشكلة البائع المتجول باهتمام واسع بسبب تعدد تطبيقاتها في مجالات مختلفة، مثل تخطيط مسارات النقل والزيارات، والخدمات اللوجستية، وجدولة العمليات، وتحديد المسارات، وتخطيط شبكات الطرق، مما جعلها محورا رئيسيا في تطوير أساليب التحسين الحديثة (Lawler et al., 1985). ومع تعقيدها، ظهرت الحاجة إلى استخدام الخوارزميات الاسترشادية (Meta-heuristic Algorithm) وتهدف معالجة هذه المشكلة إلى تنظيم وترتيب زيارة المواقع وتقليل المسافة أو الزمن الكلي للمسار، بما يساعد على تحسين استخدام الموارد ودعم اتخاذ القرار.

وقد طورت عدة أساليب لمعالجة مشكلة البائع المتجول، من بينها الأساليب التقليدية مثل البحث الشامل (Brute Force)، والخوارزمية الجشعة (Greedy Algorithm)، وطريقة الفرع والحد (Branch and Bound). وعلى الرغم من قدرة بعض هذه الأساليب على الوصول إلى حلول دقيقة؛ بسبب ارتفاع عدد المسارات المطلوب فحصها. لذلك ظهرت الحاجة إلى استخدام الخوارزميات الاسترشادية، ومن أبرزها الخوارزمية الجينية (Genetic Algorithm)، التي تستند إلى محاكاة مبادئ الانتقاء الطبيعي والتطور البيولوجي حيث أسسها Holland (1975) وتعتمد الخوارزمية الجينية على إنشاء مجموعة أولية من الحلول، ثم تقييم هذه الحلول وتطويرها عبر أجيال متتابعة باستخدام عمليات الاختيار والتزاوج والطفرات، بهدف تحسين جودة الحلول والوصول إلى حل أمثل أو قريب من الأمثل. وتتميز هذه الخوارزمية بقدرتها على التعامل مع مسائل التحسين المعقدة، وتحقيق توازن بين جودة الحل وسرعة الوصول إليه. وقد أثبتت الدراسات التطبيقية الحديثة فعاليتها في تحسين المسارات وتقليل التكاليف التشغيلية في قطاعات متعددة، مثل المجال الصحي (الشمرتي وموسى، 2022)، توزيع المواد الغذائية (أوهيبة وآخرون، 2023)، والخدمات الطبية (الشيخ وآخرون، 2024).

بناء على ذلك، تهدف هذه الدراسة إلى تطبيق الخوارزمية الجينية على مسار زيارة مراكز التلوين التابعة لدهانات المدينة مصراتة – بمدينة مصراتة، وذلك لتحسين مسار زيارة مراكز التلوين وتقليل المسافة الكلية، بما يسهم في رفع الكفاءة التشغيلية ودعم القرار داخل الشركة.

2. مشكلة الدراسة:

تتمثل مشكلة هذه الدراسة في تحديد المسار المناسب الذي يمكن أن يسلكه موزع دهانات المدينة مصراتة لزيارة مراكز التلوين التابعة لها، حيث يتطلب ذلك الانتقال بين مجموعة من المواقع داخل مدينة مصراتة، تشمل المعرض الرئيسي وعشرة مراكز تلوين أخرى، بحيث تتم زيارة كل مركز تلوين مرة واحدة فقط، ثم العودة إلى نقطة الانطلاق. وتكمن صعوبة هذه المشكلة في تعدد المسارات الممكنة التي يمكن اتباعها لزيارة هذه المواقع، واختلاف إجمالي المسافة المقطوعة باختلاف ترتيب الزيارة.

وبما أن عدد المواقع التي يجب زيارتها يبلغ (11) موقعا، ويمثل المعرض الرئيسي نقطة البداية والنهاية الثابتة، فإن عدد الترتيبات المحتملة لزيارة مراكز التلوين العشرة يساوي (10!)، أي ما يعادل (3,628,800)مسار محتمل. وبالتالي، فإن تحديد المسار الذي يحقق أقل مسافة كلية من بين هذا العدد الكبير من المسارات يمثل تحديا حسابيا، ويجعل عملية حصر جميع البدائل وتقييمها أمر بالغ الصعوبة، الأمر الذي يستدعي الاستعانة بأساليب كمية وحاسوبية مناسبة لمعالجة هذه المشكلة.

وانطلاقا من ذلك، تتجه هذه الدراسة إلى استخدام الخوارزمية الجينية (Genetic Algorithm)، باعتبارها أحد الأساليب الاسترشادية المستخدمة في معالجة مشكلة البائع المتجول (Traveling Salesman Problem – TSP)، وذلك من خلال تطبيقها باستخدام أداة (Solver) في برنامج (Microsoft Excel)، بهدف استكشاف المسارات المحتملة والوصول إلى أفضل مسار استرشادي من حيث إجمالي المسافة المقطوعة، ومقارنته بالمسار الحالي لزيارة مراكز التلوين التابعة لدهانات المدينة مصراتة. وتجدر الإشارة إلى أن استخدام الخوارزمية الجينية لا يضمن الوصول إلى الحل الأمثل عالميا، وإنما يهدف إلى الوصول إلى حل جيد من بين المسارات الممكنة.

وبناء على ما سبق، تتمثل مشكلة الدراسة في الإجابة عن التساؤل الرئيس الآتي:

ما المسار الذي يحقق أقل مسافة كلية لزيارة مراكز التلوين التابعة لدهانات المدينة مصراتة باستخدام الخوارزمية الجينية؟

3. أهداف الدراسة:

تسعى هذه الدراسة إلى تحقيق الأهداف الرئيسة الآتية:

1. تحديد المسار المقترح لزيارة مراكز التلوين التابعة لدهانات المدينة مصراتة بدءا من المعرض الرئيسي والمرور بجميع مراكز التلوين مرة واحدة، ثم العودة إلى نقطة البداية باستخدام الخوارزمية الجينية..

2. صياغة نموذج رياضي دقيق لمشكلة البائع المتجول (TSP) يراعي خصائص مصفوفة المسافات غير المتناظرة \(Asymmetric Matrix) بين المعرض الرئيسي ومراكز التلوين التابعة لدهانات المدينة مصراتة.

3. تطبيق الخوارزمية الجينية (GA) عبر أداة (Solver) في برنامج(Microsoft Excel) باستخدام محرك (Evolutionary) لتحديد المسار المقترح الأقرب للأمثل، ولمعالجة مشكلة البائع المتجول بالاعتماد على مصفوفة المسافات بين مواقع الدراسة.

4. قياس مقدار ونسبة التحسن في المسافة المقطوعة الناتج عن تطبيق الخوارزمية الجينية، ومقارنتها بإجمالي المسافة في المسار الحالي.

4. أهمية الدراسة:

تتمثل أهمية الدراسة في الجوانب العلمية والمنهجية والتطبيقية الآتية:

1. الأهمية العلمية: تسهم الدراسة في إثراء الجانب التطبيقي لبحوث العمليات من خلال تناول مشكلة البائع المتجول وتوضيح إمكانية استخدام الخوارزمية الجينية في معالجة مشكلات المسارات والتوزيع.

2. الأهمية المنهجية: توضح الدراسة كيفية توظيف الخوارزمية الجينية باستخدام أداة (Solver) في برنامج (Microsoft Excel)، بالاعتماد على مصفوفة المسافات بين المواقع، للوصول إلى حل استرشادي لمشكلة البائع المتجول.

3. الأهمية التطبيقية: تقدم الدراسة مسارا مقترحا لزيارة المعرض الرئيسي وعشرة مراكز التلوين التابعة لدهانات المدينة مصراتة، مع مراعاة زيارة كل مركز تلوين مرة واحدة والعودة إلى نقطة الانطلاق.

4. أهمية دعم اتخاذ القرار: تتيح نتائج الدراسة مقارنة المسار الناتج عن تطبيق الخوارزمية الجينية بالمسار الحالي من حيث إجمالي المسافة المقطوعة، بما يوفر أساسا كميا يمكن الاستفادة منه في تخطيط مسارات الزيارات واتخاذ القرارات المتعلقة بها.

5. إمكانية الاستفادة من نتائج الدراسة: يمكن الاسترشاد بالإجراءات المستخدمة في الدراسة عند معالجة مشكلات مشابهة تتعلق بتحديد مسارات الزيارة والتوزيع لدى المؤسسات التي تتعامل مع مواقع متعددة.

5. منهجية الدراسة:

اعتمدت هذه الدراسة على المنهج الكمي التطبيقي لتحليل مشكلة البائع المتجول وتحديد أقصر مسار ممكن لزيارة مراكز التلوين التابعة لدهانات المدينة بمصراتة. وتمثلت البيانات المستخدمة في مواقع (11) موقعا، تشمل المعرض الرئيسي و (10) مراكز تلوين أخرى، بالإضافة إلى المسافات بين هذه المواقع.

وقد تم الحصول على مواقع مراكز التلوين وإحداثياتها باستخدام تطبيق Google Maps بتاريخ [2026/10/20]، ثم إعداد مصفوفة المسافات بين كل موقع وآخر لتكون الأساس الكمي لتقييم المسارات المحتملة ومقارنة المسافة الكلية لكل ترتيب من ترتيبات الزيارة.

ولحل المشكلة، تم استخدام أسلوب تطوري Evolutionary Method ضمن أداة Solver في برنامج Microsoft Excel 2016، بوصفه تنفيذا استرشاديا قريبا من الخوارزمية الجينية (Genetic Algorithm)، للوصول إلى حل جيد من بين المسارات الممكنة.

تم تحديد دالة الهدف في تقليل مجموع المسافات الكلية، مع فرض قيود تضمن زيارة كل موقع مرة واحدة فقط والعودة إلى المعرض الرئيسي باعتباره نقطة البداية.

وتتمثل خطوات التطبيق فيما يلي:

- إدخال مصفوفة المسافات إلى برنامج Excel.
- تحديد خلية دالة الهدف واختيار خيار التقليل Min.
- ثم تحديد خلايا الحل والمتغيرات والقيود اللازمة للمشكلة.
- تشغيل الخوارزمية الجينية لتوليد مجموعة من الحلول الأولية، ثم تحسينها تدريجيا عبر عمليات الاختيار والتزاوج والطفرات، إلى أن تصل إلى ترتيب مناسب لزيارة المواقع.

وبذلك تتيح المنهجية المعتمدة مقارنة الترتيبات الممكنة بصورة كمية، واختيار المسار الذي يحقق أقل مجموع للمسافات بين المواقع، مع الالتزام بقيود مشكلة البائع المتجول. وتظهر هذه المنهجية قدرة الخوارزمية الجينية على التعامل مع عدد كبير من البدائل وتقديم حلول عملية قريبة من الحل الأمثل خلال زمن معقول، بما يعزز من كفاءة التشغيل ودعم اتخاذ القرار داخل الشركة.

6. الدراسات السابقة:

تناولت العديد من الأدبيات العلمية مشكلة البائع المتجول (Traveling Salesman Problem – TSP) بالتحليل والمفاضلة بين أساليب التحسين التقليدية والاسترشادية. وتستعرض هذه الدراسة أبرز الأدبيات ذات الصلة مقسمةً إلى محورين رئيسيين: المحور الأول يستعرض التأصيل النظري والتطور الخوارزمي، بينما يستعرض المحور الثاني الدراسات التطبيقية ذات الصلة.

- **الدراسات الخاصة بالتأصيل النظري والتطور الخوارزمي:**

استعرض Dantzig et al. (1954) إحدى أوائل المحاولات الرياضية لحل مشكلات المسارات واسعة النطاق(TSP) ، مؤكدين صعوبة الوصول للحلول المثلى بالطرق اليدوية مع كبر حجم العينات. وفي صياغة موسعة، قدم Lawler et al. (1985) توثيقاً شاملاً للمفاهيم النظرية والرياضية لمشكلة البائع المتجول وتصنيفها ضمن المسائل المعقدة حسابياً .(NP–Hard) وفيما يتعلق بالذكاء الاصطناعي والأساليب الاسترشادية، وضع Holland (1975) الأساس العلمي للخوارزميات الجينية (Genetic Algorithms – GA) القائمة على محاكاة التطور البيولوجي والانتقاء الطبيعي عبر عمليات التزاوج والطفرات .

كما أصل Goldberg (1989) استخدام الخوارزمية الجينية في مسائل البحث والتحسين التوافقي، مبيناً قدرتها الفائقة على استكشاف فضاء الحلول واسع النطاق والحد من الوقوع في الحلول المحلية غير المثلى.

- **الدراسات التطبيقية الميدانية:**

استهدف Rexhepi et al (2011) تحديد أقصر مسار لتنقل الخدمات بين 30 بلديّة و1,467 تجمعاً سكنياً بجمهورية كوسوفو باستخدام الخوارزمية الجينية (GA) عبر تطبيق حاسوبي جرى تطويره بلغة (#C). وأكدت النتائج تفوق الخوارزمية وتجاوزها الطرق التقليدية (مثل البرمجة الديناميكية والتفرع والحد) بالوصول إلى حلول مقاربة للمثلى (Near\ Optimal) خلال زمن حاسوبي قصير. وفي إطار تطوير كفاءة المعالجة، قدم Al–Ibrahim (2020) دراسة هدفت إلى تعزيز أداء الخوارزميات الجينية لحل مسألة البائع المتجول عبر اقتراح آلية تقاطع (Crossover) جديدة مدمجة مع خوارزمية بحث محلي. وأظهرت النتائج الميدانية على اختبارات قياسية الوصول إلى الحل الأمثل بنسبة (100%) لعدة عينات، ومع تفوق واضح في جودة الحل وزمن المعالجة مقارنة بالآليات التقليدية. وبهدف معالجة أوقات الانتظار في القطاع الصحي، طبق الشمرتي وموسى (2022) الخوارزمية الجينية لتقليل وقت انتظار المراجعين بقسم الأشعة في مستشفى الواسطي التعليمي بالعراق باستعمال برنامجي MATLAB وWin QSB؛ وأظهرت النتائج خفضاً ملحوظاً في أوقات الانتظار وتحسيناً كبيراً في الكفاءة التشغيلية وجودة الخدمة الطبية. وفي دراسة لوجستية محلية، قام أوهيبة وآخرون (2023) بتطبيق الخوارزمية الجينية لتوجيه مركبة توزيع المواد الغذائية التابعة لمركز الوسيط بمدينة مصراتة عبر (25) موقعاً؛ وأسفرت النتائج عن تقليص المسافة المقطوعة من (63.8 كم) إلى (46.15 كم)، بنسبة تحسن قدرها (27.67%) وبوفر مسافة قدره (17.65 كم).

وفي الاتجاه ذاته، طبق الشيخ وآخرون (2024) الخوارزمية الجينية باستعمال أداة Solver في برنامج Excel لحل مشكلة التوزيع لمركز المستقبل للتركيبات السنية بمدينة مصراتة بين (10) عيادات ومراكز طبية (10! = 3,628,800 مسار محتمل). وأظهرت النتائج انخفاض طول المسار من (53.89 كم) في الوضع الحالي إلى (41.24 كم)، محققة نسبة تحسن بلغت (23.5%). كما اقترح Binjubier et al (2024) خوارزمية جينية متوازية (Parallel\ GA) معجلة بـ (GPU) عبر تقنية CUDA لحل مسائل (TSP) كبيرة الحجم؛ وأثبتت التجارب الميدانية خفض متوسط زمن المعالجة إلى (0.7 ثانية) مقارنة بالتنفيذ التسلسلي دون التضحية بجودة الحلول. وفي دراسة حديثة

لرفع كفاءة النقل اللوجستي، طبّق Naufal & Hasibuan (2025) نهجاً هجيناً يجمع بين الخوارزمية الجشعة (Greedy Algorithm) والبيئة الجينية (GA) عبر برنامج MATLAB لتحديد مسارات التوزيع لتجار التجزئة؛ حيث حقق النموذج خفضاً في مسافة السفر بمقدار (1,260 متراً) وتقليصاً ملموساً في زمن النقل واستهلاك الوقود. وفي سياق معالجة الانحراف المبكر الخوارزمي، طور Rafique et al. (2024) نموذجاً يدمج الخوارزمية الجينية مع خرائط التنظيم الذاتي (SOM) لتحديد مسارات النقل بين المدن الباكستانية؛ وأكدت النتائج تحقيق خفض في المسافة المقطوعة بنسبة (18.3%) وتوفير سنوي قدره (4.53 مليون دولار) في حالة لوجستية شملت 200 مدينة. أما Rosada et al. (2026) فقد درسوا تحسين مسارات الزيارات الاجتماعية بنمذجتها وفق مشكلة البائع المتجول (TSP) باستخدام خوارزمية البرمجة الديناميكية وتطبيق الاستدلال العكسي عبر بيانات Google Maps؛ وحققت الدراسة مسافة كلية دنيا بلغت (28.29 كم)، مؤكدةً كفاءة البرمجة الديناميكية في المشكلات صغيرة الحجم.

- **التعقيب على الدراسات السابقة وما تميزت به الدراسة الحالية يتضح من الاستعراض المنهجي للدراسات السابقة ما يلي:**

1- من حيث الأساليب والأدوات: اتفقت الأدبيات على كفاءة الخوارزميات الاسترشادية —وفي مقدمتها الخوارزمية الجينية (GA) في التعامل مع التعقيد الحسابي البالغ لمشكلات (NP-Hard) وتفوقها على الأساليب التقليدية واليدوية.

2- من حيث مجالات التطبيق: ركزت معظم التطبيقات التطبيقية الميدانية (ولا سيما المحلية بمدينة مصراتة) على قطاعات توزيع السلع الغذائية الاستهلاكية (مثل أوهيبة وآخرون، 2023) أو قطاع الخدمات الطبية وعيادات الأسنان (مثل الشيخ وآخرون، 2024).

3- ما تميزت به الدراسة الحالية: تتميز الدراسة الحالية بتوجيه النموذج الكمي القائم على الخوارزمية الجينية (عبر محرك Evolutionary في Excel Solver) نحو قطاع تصنيع الدهانات والطلاء ومراكز التلوين التابعة لها. وهو قطاع صناعي وتكميلي يتسم بخصوصية لوجستية قائمة على شبكة توزيع غير متناظرة (Asymmetric\ Matrix) نتيجة اتجاهات الطرق والتقاطعات بمدينة مصراتة. كما ترتبط الدراسة الحالة بقياس ثبات واستقرار الحلول عبر تشغيلات مستقلة متعددة، وربط الوفر المحقق (26.7%) بالأثر الاقتصادي والتراكمي طويل الأمد لشركة مساهمة كبرى.

7. النموذج الرياضي لمشكلة البائع المتجول (TSP):

لغرض معالجة مشكلة الدراسة المتمثلة في تحديد المسار الأمثل، أو الأقصر مسافة، الذي يربط بين المعرض الرئيسي لدهانات المدينة بمصراتة وعدد **10** من مراكز التلوين الأخرى، تم الاعتماد على نموذج رياضي لمشكلة البائع المتجول **(TSP)**.

ويمثل المعرض الرئيسي نقطة البداية والنهاية، في حين تمثل مراكز التلوين العشرة المواقع التي يجب زيارتها. وبما أن المعرض الرئيسي نقطة ثابتة، فإن عدد المسارات المحتملة لزيارة المراكز العشرة تساوي:

$$\text{مسارا } 3628800 = 10!$$

وتوجد عدة صيغ رياضية لمشكلة البائع المتجول، إلا أن جميعها تهدف إلى تحديد المسار الأمثل الذي يزور فيه البائع كل مدينة مرة واحدة فقط ثم يعود إلى نقطة البداية، مع تقليل المسافة أو التكلفة الكلية للرحلة ضمن القيود المحددة (Jain.L & Bhanot. AK 2012).

ويمكن صياغة النموذج الرياضي للمشكلة كما يلي:

$$\text{Minimize} \sum(\iota = 1\ to\ n) \sum(j = 1\ to\ n) c\ [i\ ,j] * x\ [i] * x\ [j] \ldots . (1)$$

خاضعا للقيود:

$$\sum(\iota = 1\ to\ n)\ x\ [i] = n \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (2)$$

$$x\ [i] = \{0,1\} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (3)$$

$$x\ [1] = 1 \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (4)$$

حيث أن:

$n = 10$: تمثل عدد مراكز التلوين المطلوب زيارتها.

$c\ [i,j]$: تمثل المسافة بين الموقع i والموقع j

$x\ [i,j]$: تمثل متغير اتخاذ القرار، يأخذ القيمة 1 إذا تم الانتقال من الموقع i إلى الموقع j ، والقيمة 0 خلاف ذلك.

تفسير النموذج:

– المعادلة رقم (1): تمثل دالة الهدف، وتهدف إلى تقليل إجمالي المسافة المقطوعة لزيارة مراكز التلوين العشرة، بدءا من المعرض الرئيسي والعودة إليه.

– المعادلة رقم (2): تمثل القيد الأول الذي يضمن مغادرة كل موقع مرة واحدة فقط.

– المعادلة رقم (3): تمثل القيد الثاني الذي يضمن الوصول إلى كل موقع مرة واحدة فقط، وبذلك تتم زيارة جميع مراكز التلوين دون تكرار.

– المعادلة رقم (4): تمثل القيد الثالث الذي يوضح أن متغيرات القرار ثنائية، بحيث تأخذ القيمة 1 عند الانتقال من الموقع i إلى الموقع j، وتأخذ القيمة 0 في الحالة العكسية.

8. الخوارزمية الجينية (GA):

تعتمد الخوارزمية الجينية على مبدأ التطور الطبيعي لإيجاد حلول مثلى للمشكلات المعقدة. وتهدف إلى الوصول إلى أفضل حل ممكن من خلال "تربية" مجموعة من الحلول المحتملة عبر عدة أجيال متتالية.

ويمكن توضيح آلية عمل هذه الخوارزمية من خلال مخطط يبين مراحلها الأساسية كما موضح بالشكل (1).

ويمكن شرح الخطوات الواردة في المخطط السابق على النحو الآتي:

1) توليد الحلول الأولية: تبدأ الخوارزمية بتوليد مجموعة من الحلول الأولية بشكل عشوائي، وتُعرف هذه المجموعة باسم "السكان " (Population)، ويرمز لحجمها بالرمز (N).

2) تقييم الحلول واختيار الأفضل: يتم تقييم كل حل داخل المجتمع باستخدام دالة تقييم(Fitness Function) ، والتي تمثل معيار المفاضلة (وفي هذه الدراسة تم اعتماد أقصر مسار). بعد ذلك يتم اختيار عدد (n)من أفضل الحلول، والتي تتميز بأعلى كفاءة، لتكون أساسًا لعملية التكاثر وإنتاج جيل جديد.

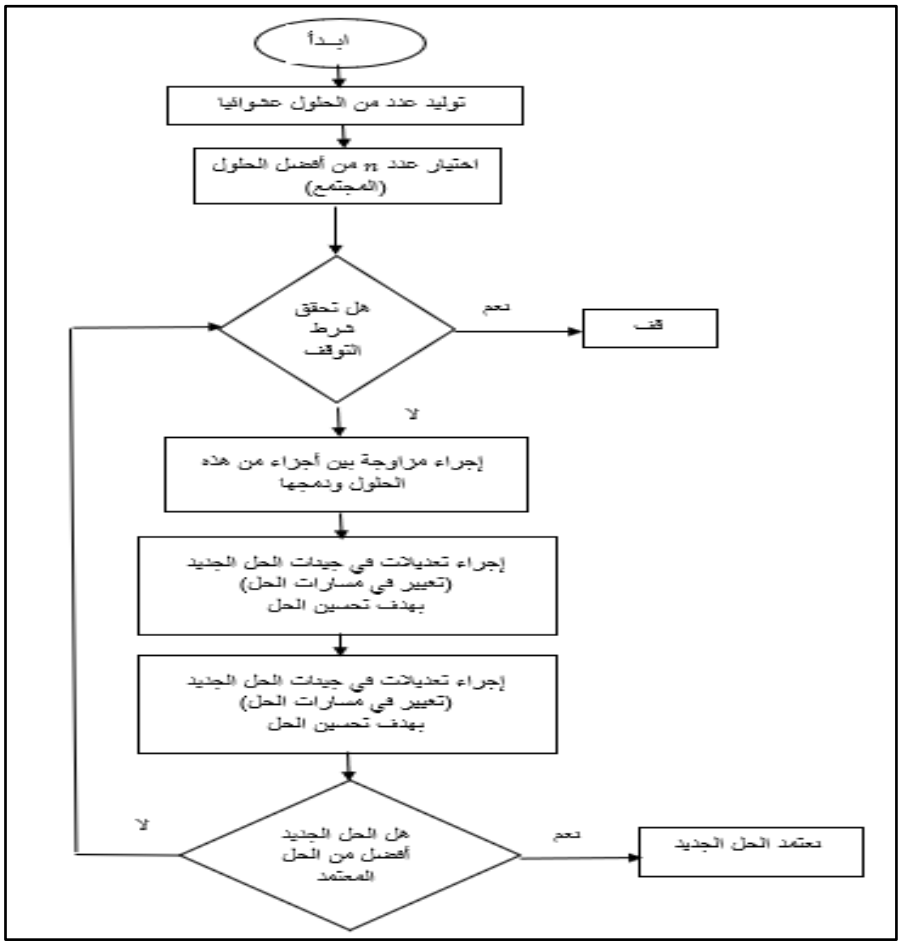
3) التحقق من شرط التوقف: تستمر الخوارزمية في تنفيذ خطواتها بشكل تكراري عبر عدة أجيال، إلى حين تحقق شرط التوقف المحدد مسبقًا، مثل الوصول إلى عدد معين من الأجيال أو تحقيق مستوى أداء معين.

4) تنفيذ عملية التزاوج (Crossover): يتم إجراء عملية التزاوج بين الحلول المختارة، وذلك من خلال دمج أجزاء من هذه الحلول لإنتاج حلول (أفراد) جديدة.

5) تنفيذ عملية الطفرات (Mutation): تُجرى تعديلات عشوائية على بعض مكونات الحلول الجديدة، بهدف إدخال التنوع وتجنب الوقوع في الحلول المحلية، مما يسهم في تحسين جودة الحل.

6) تقييم الجيل الجديد: يتم تقييم الحلول الناتجة في الجيل الجديد باستخدام نفس دالة التقييم، بهدف تحديد مدى كفاءتها مقارنة بالحلول السابقة.

7) اختيار واعتماد أفضل حل: يتم اختيار أفضل حل تم التوصل إليه عبر الأجيال المتعاقبة، بحيث يمثل الحل الأمثل أو الأقرب إلى الحل الأمثل للمشكلة محل الدراسة.



الشكل (1) مخطط لآلية عمل الخوارزمية الجينية (GA). (الشيخ وآخرون، 2024)

1.8خصائص الخوارزمية الجينية وتطبيقاتها: إن الطبيعة التكرارية لهذه الخوارزمية، المعتمدة على عمليات الانتقاء والتزاوج والطفرات، تجعلها قادرة على البحث عن الحل الأمثل (Optimal Solution) أو الحل شبه الأمثل (Near Optimal Solution) في المشكلات التي يصعب حلها بالطرق التقليدية. وقد أثبتت الخوارزمية الجينية كفاءتها في العديد من المجالات مثل الهندسة، والعلوم، وإدارة الأعمال. ونظرًا لكونها من الخوارزميات التكرارية(Iterative Algorithms) ، فإن تطبيقها يدويًا يُعد معقدًا، لذلك يتم الاعتماد على لغات البرمجة المختلفة مثل (.C++, C Sharp, MATLAB, R) لتنفيذها، حيث يساهم تكرار العمليات في تحسين جودة الحلول تدريجيًا. وتندرج هذه الخوارزمية ضمن أساليب البحث الاسترشادي (Heuristic) وما وراء الاسترشادي(**Rexhepi et al, 2013**).

9. التطبيق العملي:

يركز هذا الجانب على التطبيق العملي للخوارزمية الجينية عبر أداة (Solver) في برنامج (Excel) لمعالجة مشكلة البحث، وذلك بهدف تحديد المسار الأمثل والأقصر الذي يسلكه موزع دهانات المدينة مصراتة Almadina Misurata Paints لتغطية المراكز الـ 11 المستهدفة. وقبل الخوض في التفاصيل التقنية للتطبيق، سنستعرض نبذة تعريفية عن الشركة ومراكزها محل الدراسة، ومن ثم الخوض في عملية تطبيق الخوارزمية.

1.9 نبذة عن دهانات المدينة مصراتة:

تعد شركة دهانات المدينة مصراتة إحدى الشركات الرائدة في مجال صناعة الطلاء والمعاجين في ليبيا، وهي إحدى الشركات التابعة لمجموعة المدينة القابضة. تأسست بمدينة مصراتة عام 1993م، وبدأت كمصنع صغير يحمل اسم مصنع المدينة مصراتة، ثم تحولت خلال فترة وجيزة إلى شركة مساهمة كبرى بفضل رؤيتها الطموحة وجهود إدارتها في تطوير صناعة الدهانات محلياً. وقد نجحت الشركة في بناء قاعدة إنتاجية قوية جعلتها من أكبر مصانع الطلاء في ليبيا، حيث تنتج أكثر من 90 منتجاً متنوعاً يشمل المعاجين، الدهانات المائية، الزيتية، الصناعية، العوازل، البحرية، والدهانات الديكورية، وغيرها من منتجات الطلاء عالية الجودة والصديقة للبيئة. وتتميز الشركة بشبكة توزيع واسعة داخل مدينة مصراتة، تضم أحد عشر مركز تلوين موزعة في مناطق مختلفة من المدينة، تُستخدم لتلبية احتياجات العملاء وتوفير الألوان المطلوبة بدقة وسرعة. وتُعد هذه المراكز جزءاً أساسياً من منظومة التشغيل والتوزيع التي تعتمد عليها الشركة في إيصال منتجاتها إلى المستهلكين والموزعين المحليين، بما يعزز من كفاءتها التشغيلية ويُسهم في دعم الاقتصاد الوطني. ومن خلال هذه البنية المتكاملة، استطاعت دهانات المدينة مصراتة أن تحقق الريادة في مجال صناعة الطلاء، وأن تكون نموذجاً ناجحاً في تطبيق الأساليب العلمية الحديثة لتحسين الأداء وتطوير الخدمات. (**https://almadinamisurata.ly/about/**).

جدول رقم (1) يوضح عنوان إحداثيات المعرض الرئيسي لدهانات المدينة مصراتة ومراكز التلوين.

ر.م	اسم المعرض	العنوان	مواقع (الإحداثيات) المعرض الرئيسي ومراكز التلوين داخل مدينة مصراتة
1	المعرض الرئيسي	شارع بنغازي	935+ 3J3
2	مركز تلوين الجزيرة	شارع الديس	93HX+52J
3	مركز تلوين الزاهي	طريق الحاويات	84XR+MR6
4	مركز تلوين قصر أحمد	جزيرة الرعيضات	9594+QG
5	مركز تلوين سند1	شارع بنغازي	93CV+CJ
6	مركز تلوين 2 المدائن	شارع طرابلس	938J+WG7
7	مركز تلوين الياقوت	قصر أحمد	94GF+7R
8	مركز تلوين الوافي	طريق المطار	82XV+6Q8
9	مركز تلوين اقزير	اقزير (سي خليفة)	83GX+6PJ
10	مركز تلوين 9	الطريق الساحلي بعد الإشارة الضوئية الثقيل	84G6+635

11	دهانات المدينة مصراتة كرزاز	بالقرب من مستوصف كرزاز	74W6+933

تم الحصول على إحداثيات مراكز التلوين باستخدام تطبيق قوقل (Google Maps).

2.9 تطبيق الخوارزمية الجينية (GA) باستخدام الأكسل (Evolutionary Method):

لغرض معالجة مشكلة الدراسة، تم الاعتماد على أسلوب تطوري (Evolutionary Method) متاح ضمن أداة (Solver) في برنامج Excel، وهو أسلوب استرشادي يستند إلى مبادئ الخوارزمية الجينية، بهدف الوصول إلى مسار قريب من الأمثل، وذلك وفق الخطوات المنهجية الآتية:

1.2.9 إيجاد مصفوفة المسافات (Distance Matrix):

وهي عبارة عن مصفوفة تمثل المسافات بين المواقع المختلفة (مراكز التلوين) وموقع المعرض الرئيسي لدهانات المدينة بمدينة مصراتة (موضوع البحث)، والذي يعني إيجاد المسافة بين كل نقطتين (i , j). وهنا تم استخدام تطبيق خرائط قوقل (Google Map)؛ والذي يمكن عن طريقه تحديد أقصر مسار بين أي موقعين (j , i)، ويظهر ذلك (مصفوفة المسافات) كما في الجدول (2).

الجدول (2) مصفوفة المسافات بين موقع المعرض الرئيسي وجميع مواقع مراكز التوزيع (التلوين)

	J	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	اسم الموقع	المعرض الرئيسي	مركز تلوين الجزيرة	مركز تلوين الزاهي	مركز تلوين قصر أحمد	مركز تلوين سند 1	مركز تلوين 2 المدائن	مركز تلوين الياقوت	مركز تلوين الوافي	مركز تلوين اقزير	مركز تلوين 9	دهانات المدينة مصراتة كرزاز
1	المعرض الرئيسي	0	2.6	5.8	6.9	1.9	4.7	4.3	7.3	4.7	7.6	8.4
2	مركز تلوين الجزيرة	4.0	0	6.8	6.0	1.3	7.4	2.9	6.7	7.4	10	7.1
3	مركز تلوين الزاهي	6.4	8.4	0	4.4	7.7	6.7	5.8	12	6.7	9.0	10
4	مركز تلوين قصر أحمد	7.2	6.1	4.5	0	6.9	10	3.5	12	10	13	14
5	مركز تلوين سند 1	2.7	1.2	6.4	6.8	0	6.2	3.6	6.6	6.2	9.1	9.8
6	مركز تلوين 2 المدائن	4.6	7.4	9.1	10	6.5	0	8.8	7.8	11	3.9	3.6

	J	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	اسم الموقع	المعرض الرئيسي	مركز تلوين الجزيرة	مركز تلوين الزاهي	مركز تلوين قصر أحمد	مركز تلوين سند 1	مركز تلوين 2 المدائن	مركز تلوين الياقوت	مركز تلوين الوافي	مركز تلوين اقزير	مركز تلوين 9	دهانات المدينة مصراتة كرزاز
7	مركز تلوين الياقوت	4.9	2.6	4.7	4.4	3.4	8.4	0	9.3	8.4	11	12
8	مركز تلوين الوافي	11	10	16	17	9.4	10	17	0	10	15	14
9	مركز تلوين اقزير	4.6	7.6	9.1	10	6.7	5.8	8.8	7.8	0	3.9	3.6
10	مركز تلوين 9	5.7	7.6	7.8	8.9	7.9	2.7	9.1	7.8	2.7	0	6.1
11	دهانات المدينة مصراتة كرزاز	8.0	11	11	12	9.9	3.7	13	11	3.7	3.5	0

يوضح الجدول (2) (مصفوفة المسافات) المسافات بين المعرض الرئيسي لدهانات المدينة مصراتة ومراكز التلوين التابعة له، إضافة إلى المسافات بين مراكز التلوين بعضها ببعض، حيث تم الحصول على هذه البيانات باستخدام تطبيق خرائط Google. وتمثل كل قيمة في المصفوفة المسافة بين موقعين مختلفين، يشار إليهما بالرمزين (i, j) فعلى سبيل المثال، تبلغ المسافة من المعرض الرئيسي (1) إلى مركز تلوين الجزيرة (2) نحو (2.6 كم)، في حين تبلغ المسافة في الاتجاه العكسي، من مركز تلوين الجزيرة (2) إلى المعرض الرئيسي (1)، نحو (4.0 كم). كما تبلغ المسافة من المعرض الرئيسي (1) إلى مركز تلوين سند1 (5) نحو (1.9 كم)، بينما تصل المسافة في الاتجاه المعاكس إلى (2.7 كم). ويشير اختلاف هذه القيم إلى أن مصفوفة المسافات المستخدمة في الدراسة غير متناظرة (Asymmetric Matrix).

وتجدر الإشارة إلى بعض الملاحظات المتعلقة بمصفوفة المسافات، وذلك على النحو الآتي:

أ- جميع القيم الواقعة على القطر الرئيسي للمصفوفة تساوي صفرا؛ لأنها تمثل المسافة بين الموقع ونفسه، فلا توجد مسافة انتقالية بين الموقع وذاته.

ب- لا تتساوى بالضرورة قيم المسافات المتناظرة حول القطر الرئيسي للمصفوفة، أي إن المسافة من الموقع (i) إلى الموقع (j) قد تختلف عن المسافة من الموقع (j) إلى الموقع (i)، كما يتضح من الأمثلة السابقة. ويرجع ذلك إلى اختلاف اتجاهات الطرق والمسارات المتاحة بين المواقع داخل مدينة مصراتة.

وبذلك تمثل مصفوفة المسافات المدخل الأساسي لبناء النموذج الرياضي لمشكلة البائع المتجول (TSP)، إذ تعتمد عليها الخوارزمية الجينية في تقييم المسارات الممكنة واختيار المسار الذي يحقق أقل مسافة إجمالية، مع ضمان المرور بجميع مراكز التلوين مرة واحدة والعودة إلى المعرض الرئيسي.

2.2.9. برمجة الخوارزمية الجينية باستخدام (Evolutionary Method):

في هذه الخطوة تم إدراج مصفوفة المسافات الخاصة بالمعرض الرئيسي لدهانات المدينة مصراتة ومراكز التلوين التابعة له في ورقة عمل ببرنامج الأكسل (Excel Sheet)، ومن ثم تمت برمجة المشكلة باستخدام أداة (Solver)، وذلك من خلال تحديد خلية دالة الهدف (Objective Function) التي تمثل مجموع المسافات الكلية للمسار الذي يربط بين جميع المواقع، وقد تم اختيار أسلوب التقليل (Minimize)، بهدف الوصول إلى أقل مسافة إجمالية ممكنة. بعد ذلك، تم تحديد خلايا متغيرات الحل (Changing Variable Cells)، التي تمثل ترتيب زيارة المواقع، وإضافة قيود المشكلة (Constraints) بما يضمن زيارة كل مركز تلوين مرة واحدة فقط، مع العودة إلى المعرض الرئيسي باعتباره نقطة الانطلاق ونقطة الوصول.

3.2.9 تغير بعض المعلمات (Evolutionary) من أيقونة (Options):

قامت شركة مايكروسوفت بتوفير مجموعة من الخيارات والمعلمات داخل أداة (Solver) في تطبيق(Excel) ، وذلك بهدف التحكم في أداء الخوارزمية الجينية (Evolutionary Method) بما يتناسب مع طبيعة المشكلة المراد حلها وحجمها، حيث تساعد هذه المعلمات في تحسين جودة الحلول والوصول إلى نتائج أكثر دقة وكفاءة. ومن أهم هذه المعلمات ما يلي

أ- التقارب (Convergence): يشير هذا المعامل إلى مدى تقارب الحلول المتولدة أثناء تنفيذ الخوارزمية، حيث يكون التحسن في الحلول كبيرًا في المراحل الأولى، ثم يبدأ هذا التحسن بالانخفاض تدريجيًا مع زيادة عدد التكرارات. وعندما تصبح الفروق بين الحلول المتعاقبة صغيرة جدًا، فإن ذلك يدل على اقتراب الخوارزمية من الحل الأمثل أو من حل قريب جدًا منه. لذلك يمكن تعديل قيمة التقارب للحصول على نتائج أكثر دقة تتناسب مع حجم المشكلة وطبيعتها.

ب- معدل الطفرة (Mutation Rate): يعبر معدل الطفرة عن نسبة التغييرات العشوائية التي يتم إدخالها على الحلول الجديدة أثناء عملية التوليد. وتساعد هذه العملية في زيادة تنوع الحلول ومنع الخوارزمية من الوقوع في حلول محلية غير جيدة. فعلى سبيل المثال، إذا كانت قيمة معدل الطفرة تساوي (0.01)، فهذا يعني أن نسبة صغيرة من الجينات يتم تعديلها عشوائيًا في كل جيل. ويمكن تعديل هذه النسبة بما يتناسب مع طبيعة المشكلة بهدف تحسين جودة الحلول.

ج- حجم السكان (Population Size): يقصد بحجم السكان عدد الأفراد أو الحلول المحتملة التي تتعامل معها الخوارزمية في كل جيل، أي عدد الحلول التي يتم تقييمها وتحسينها أثناء عملية التكرار. وكلما زاد حجم السكان زاد التنوع الجيني، مما يساعد الخوارزمية على استكشاف عدد أكبر من الحلول وتجنب الوقوع في الحلول المحلية غير المثلى .(Local Solutions) وفي المقابل فإن زيادة حجم السكان تؤدي إلى زيادة الزمن اللازم لتنفيذ الخوارزمية، نتيجة معالجة عدد أكبر من الحلول في كل جيل.

د- البذرة العشوائية (Random Seed): تمثل البذرة العشوائية القيمة المستخدمة لتوليد الأرقام العشوائية داخل الخوارزمية، حيث تُستخدم كنقطة بداية لإنتاج سلسلة من القيم العشوائية التي تعتمد عليها الخوارزمية أثناء التنفيذ. وعند استخدام نفس قيمة البذرة يتم الحصول على

نفس سلسلة العمليات وبالتالي نفس النتائج تقريبًا، بينما يؤدي استخدام قيمة مختلفة أو تركها عشوائية إلى الحصول على نتائج مختلفة في كل مرة، مما قد يساعد في الوصول إلى حلول أفضل.

هـ – الوقت الأقصى بدون تحسين (Maximum Time Without Improvement): يشير هذا الخيار إلى المدة الزمنية القصوى التي تستمر خلالها الخوارزمية في العمل دون حدوث أي تحسن في الحل الحالي. ويُعتبر هذا المعامل مهمًا في الخوارزمية الجينية لأنه يساعد على تحديد نقطة توقف عملية البحث. فعندما يتجاوز الزمن المحدد دون تحقيق أي تحسن يتم إيقاف الخوارزمية تلقائيًا، وذلك لتقليل الزمن المستغرق في الوصول إلى الحل الأمثل أو القريب من الأمثل.

10. نتائج الحل من تطبيق الخوارزمية باستخدام (Evolutionary Method):

في حل مشكلة هذه الدراسة باستخدام طريقة الأسلوب التطوري (Evolutionary Method)، تم استخدام حاسوب محمول (Laptop) من نوع HP Pavilion g6 Notebook PC، يعمل بنظام تشغيل Microsoft Windows 10 Pro، بمعالج Intel Core i5، وذاكرة عشوائية (RAM) بسعة 4 جيجابايت، وقرص تخزين من نوع (HDD) بسعة 196 جيجابايت. وقد أظهر نتائج هذا التطبيق المدونة في التقرير اخاص بالحل (Answer Report)، إلا أنه قبل تفسير تقرير الحل نود الإشارة إلى المعلمات التي تم تعديلها على هذه الخوارزمية في الخيارات المتاحة في الأكسل بهدف الحصول على نتائج أكثر دقة وذلك كما يلي:

أ– بيانات تخص معلمات (Parameters) التي تم التعديل عليها في الخوارزمية في تطبيق الأكسل:

1. حجم السكان (Population Size): 10
2. الوقت الأقصى (Max Time Unlimited): غير محدد
3. التكرارات (Iterations Unlimited): غير محدود
4. الدقة (Precision): 0.000001
5. التقارب (Convergence): 0.0000001
6. البذور العشوائية (Random Seed): 0
7. معدل الطفرة (Mutation Rate): 0.01 %
8. الوقت بدون تحسين (Time without Improvement): 600 دقيقة

ب– أما بخصوص تفسير الحل لهذه المشكلة والذي أظهرته أداة (Solver) في ملف الأكسل والمرفق كملحق مع هذه الورقة يمكن توضحيها كما يلي:

1. تم إجراء التطبيق بتاريخ: 2026/10/26
2. المحرك (Engine) المستخدم في الحل هو (Evolutionary)
3. الوقت المستغرق في الحل (Solution Time) المقدر بالثواني هو (779.36) ثانية
4. التكرارات: عدد دورات الحل (عدد مرات عمل الخوارزمية) ما يسمى (Iterations) هو (0) دورة
5. عدد المشكلات الفرعية (Subproblems) المتولدة أثناء عملية الحل (893448) مشكلة فرعية

6. قيمة دالة الهدف (Objective Function) لهذه المشكلة والتي تهدف للتقليل (Minimize) قد بلغت (48.6)، وهذا يعني أن أقصر مسار يمكن أن يسلكه الموزع لزيارة مراكز التلوين وفقا لهذه الخوارزمية يبلغ طوله (48.6) كيلومتر.

7.خلايا المتغيرات (Changing Variable Cells) تظهر هذا المسار (مسار الحل)، ويوضح الجدول (3) هذا الحل، حيث يبدأ المسار (نقطة الانطلاقة) من مركز تلويم سند 1 باتجاه مركز تلوين الوافي حيث تبلغ المسافة (6.6 كم)، السير إلى مركز تلوين اقزير حيث تبلغ هذه المسافة (10كم)، ثم الانتقال إلى دهانات المدينة مصراتة كرزاز حيث تبلغ المسافة (3.6 كم) .... وهكذا إلى مركز مركز تلوين الجزيرة ومن ثم الرجوع إلى مركز تلوين سند1 (من مركز تلوين الجزيرة إلى مركز تلوين سند1) حيث تبلغ المسافة هذه المسافة (1.3 كم).

جدول رقم (3) مسار حل مشكلة البحث باستخدام (Evolutionary Method)

اسم المركز	المعرض الرئيسي	الياقوت	مركز تلوين 9	اقزير	الوافي	مركز تلوين 2 المدائن	كرزاز	قصر أحمد	سند1	الزاهي	الجزيرة
رقم المركز	5	8	9	11	10	6	1	3	4	7	2
المسافة (كم)	6.60	10.00	3.60	3.50	2.70	4.60	5.80	4.4	3.50	2.60	1.3

أظهرت نتائج تطبيق الخوارزمية الجينية (GA) باستخدام أداة Solver في برنامج Excel فعالية واضحة على مسار زيارة مراكز التلوين التابعة لدهانات المدينة مصراتة بمدينة مصراتة. فقد بلغ طول المسار الحالي قبل التطبيق (66.3 كم)، بينما انخفض طول المسار بعد التحسين إلى (48.6 كم)، أي بانخفاض قدره (17.7 كم)، وبنسبة تحسن بلغت (26.7%).

يوضح الجدول رقم (4) المقارنة بين المسار الحالي والمسار المحسن:

المسار	المسافة (كم)	التحسن (كم)	نسبة التحسن (%)
المسار الحالي	66.3	–	–
المسار المحسن	48.6	17.7	26.7

تظهر هذه النتائج أن استخدام الخوارزمية الجينية يسهم في تقليل المسافة المقطوعة، وهو ما يعكس إيجابا على تقليل استهلاك الوقود، خفض التكاليف التشغيلية، وتوفير الوقت اللازم لإتمام الزيارات. كما أن هذا التحسن، وإن بدا محدودا من حيث القيمة المطلقة، إلا أنه يعد مهما في السياق العملي للشركة، حيث يتكرر المسار بشكل يومي أو أسبوعي، مما يعني تراكم وفورات تشغيلية ملموسة على المدى الطويل. وتؤكد هذه النتائج فعالية الخوارزمية الجينية في معالجة مشكلات المسارات المعقدة، وتبرز أهميتها كأداة كمية مساندة لاتخاذ القرار داخل المؤسسات، خاصة في القطاعات التي تعتمد على توزيع المنتجات والخدمات عبر مواقع متعددة. كما تدعم هذه النتائج ما توصلت إليه دراسات سابقة في المجال، مثل دراسة الشيخ وآخرون (2024) التي حققت تحسنا بنسبة 23.5% في طول المسار عند تطبيق الخوارزمية الجينية على مركز المستقبل للتركيبات السنية، مما يعكس اتساق النتائج مع الأدبيات العلمية ويعزز من موثوقية المنهجية المستخدمة.

11. مناقشة النتائج ومقارنتها بالدراسات السابقة:

أظهرت نتائج الدراسة الحالية أن تطبيق الخوارزمية الجينية (Genetic Algorithm–AG) باستخدام أداة (Solver) في برنامج (Microsoft Excel)، أسهم في تحسين مسار زيارة مراكز التلوين التابعة لدهانات المدينة. فقد انخفض إجمالي المسافة المقطوعة من

(66.3 كم) وفق المسار الحالي إلى (48.6 كم) وفق المسار الناتج عن تطبيق الخوارزمية، أي بانخفاض مقداره (17.7 كم)، ونسبة تحسن بلغت (26.7%)، كما هو موضح في الجدول رقم (4).

وتشير هذه النتيجة إلى إمكانية الاستفادة من الخوارزمية الجينية في إعادة تنظيم مسارات الزيارة، من خلال المفاضلة بين الترتيبات الممكنة للمواقع والوصول إلى مسار استرشادي يحقق مسافة كلية أقل مقارنة بالمسار الحالي، مع الالتزام بزيارة جميع مراكز التلوين مرة واحدة والعودة إلى نقطة الانطلاق. وتجدر الإشارة إلى أن المسار الناتج يمثل أفضل حل توصل إليه التطبيق وفق الإعدادات المستخدمة، ولا يعني بالضرورة الوصول إلى الحل الأمثل عالميا، نظرا للطبيعة الاسترشادية للخوارزمية الجينية.

وفيما يلي مناقشة هذه النتائج في ضوء الدراسات السابقة:

أولاً: أوجه التشابه مع الدراسات السابقة:

اتفقت الدراسة مع جميع الدراسات التطبيقية السابقة في أن الخوارزمية الجينية قللت المسافة أو الزمن مقارنة بالوضع القائم، ومنها الشيخ وآخرون (2024) وأوهيبة وآخرون (2023) و Rafique et al. (2024) و Naufal & Hasibuan (2025) وهذا يدعم ما أكدته Rexhepi et al. (2011) من قدرة الخوارزمية على بلوغ حلول قريبة من المثلى.

1- تتشابه الدراسة الحالية مع دراسة الشيخ وآخرون (2024) في استخدام أداة (Solver) برنامج (Excel) بمحرك (Evolutionary) لتطبيق الخوارزمية الجينية، وفي التطبيق داخل مدينة مصراتة وعلى مسار من 10 مواقع أي (10! = 3,628,800) مسارًا محتملًا. وتتشابه مع أوهيبة وآخرون (2023) في أنها حالة توزيع محلية في المدينة نفسها.

2- استخدمت الدراسة Google Maps لتحديد المسافات، كما في دراسة Rosada et al. (2026).

ثانيا: أوجه الاختلاف مع الدراسات السابقة:

على الرغم من اتفاق الدراسة الحالية مع بعض الدراسات السابقة في اتجاه النتائج، فإن هناك اختلافا في نسب التحسن وبيئة التطبيق وأداة تنفيذ الخوارزمية.

1. فمن حيث نسبة التحسن، بلغت النسبة في الدراسة الحالية (26.7%)، وهي أقل قليلا من دراسة أوهيبة وآخرون (2023)، والبالغة (27.67%)، بينما تجاوزت النسبة التي توصلت إليها دراسة الشيخ وآخرون (2024)، والبالغة (23.5%). ويمكن أن ترتبط هذه الاختلافات بطبيعة المواقع محل الدراسة وتوزيعها الجغرافي والمسافات الطويلة بينها، فضلا عن اختلاف المسار الحالي الذي اتخذ أساسا للمقارنة في كل دراسة، ولا يمكن اعتبار اختلاف النسب دليلا بذاته على تفوق تطبيق على آخر.

2.تعاملت الدراسة مع مصفوفة مسافات غير متناظرة بسبب اتجاهات الطرق والتقاطعات داخل المدينة، بينما لم تذكر الدراسات المحلية السابقة معالجة هذه الخاصية.

3. تختلف الدراسة عن Naufal & Hasibuan (2025) و Rafique et al. (2024) اللتين دمجتا الخوارزمية الجينية بأساليب أخرى وعن Binjubier et al. (2024) التي استخدمت معالجة متوازية علىGPU ، وكذلك دراسة أوهيبة وآخرون (2023) استخدمت برنامج (MATLAB) في تطبيق الخوارزمية الجينية، أما هذه الدراسة فاعتمدت الخوارزمية الجينية في صورتها المتاحة فيExcel ، وهي أداة يسهل على الشركة تطبيقها دون برمجة.

4. استخدمت Rosada et al. (2026) البرمجة الديناميكية، وهي تناسب المشكلات الصغيرة. وتستند هذه الدراسة إلى الخوارزمية الجينية التي تحتفظ بقدرتها عند زيادة عدد المواقع.

ثالثا: ما يميز الدراسة الحالية:

1. يعد من التطبيقات الميدانية المحدودة في مصراتة على قطاع صناعة الدهانات ومراكز التلوين، بعد أن اقتصرت الدراسات المحلية على الأغذية والخدمات الطبية.

2. أنها تنقل نتيجة التحسين إلى القرار التشغيلي فنسبة (5.94%) تبدو متواضعة، لكن تكرار المسار يوميًا أو أسبوعيا يجعل الوفر تراكميا في الوقود والوقت وإهلاك المركبات.

3. أنها تعتمد أداة متاحة مجانا في Excel، فيسهل على الشركة تكرارها كلما تغيرت المواقع، خلافا للحلول التي تتطلب برمجة متخصصة.

12. التوصيات:

استنادا إلى النتائج التي توصلت إليها الدراسة، وما أظهره تطبيق الخوارزمية الجينية من انخفاض في إجمالي المسافة المقطوعة لمسار زيارة مراكز التلوين، توصي الدراسة بما يلي:

1. الاستفادة من الخوارزمية الجينية: اعتماد الخوارزمية الجينية كأداة استرشادية في تخطيط مسارات زيارة مراكز التلوين التابعة لدهانات المدينة مصراتة، والاستفادة من المسار المقترح في تنظيم عمليات الزيارة.

2. تحديث بيانات المواقع والمسافات: مراجعة وتحديث بيانات المواقع ومصفوفة المسافات بصورة دورية، بما يضمن ملاءمة المسار المقترح للتغيرات التي قد تطرأ على مواقع المراكز والطرق.

3. توظيف أدوات التحسين الكمية: الاستفادة من أداة (Solver) في برنامج (Excel) وغيرها من أدوات التحسين الكمية لدعم عملية تخطيط المسارات والمفاضلة بين البدائل المتاحة.

4. توسيع نطاق التطبيق: دراسة إمكانية تطبيق الخوارزمية الجينية على مشكلات تشغيلية أخرى داخل الشركة، مثل تخطيط عمليات التوزيع وتحديد مسارات نقل المواد الخام والمنتجات.

5. إجراء دراسات مستقبلية مقارنة: إجراء دراسات تستخدم خوارزميات استرشادية أخرى، مثل الخوارزميات الهجينة أو خوارزميات مستعمرة النمل، ومقارنة نتائجها بنتائج الخوارزمية الجينية من حيث جودة الحلول والمسافات المقطوعة.

المراجع:

أوهيبة، ج وآخرون، (2023)، تطبيق مسألة البائع المتجول على توجيه المركبات الآلية باستخدام الخوارزمية الجينية (حالة دراسية على مركز توزيع المواد الغذائية بمدينة مصراتة)، مجلة البحوث الهندسية (جامعة طرابلس ليبيا)، (35)، ص119–134.

الشمرتي، ح، س، موسى، س، ع.، (2022)، تطبيق الخوارزمية الجينية في تقليل وقت الانتظار وتحسين جودة الخدمات الصحية في قسم الأشعة/ مستشفى الواسطي التعليمي، مجلة كلية الكوت الجامعة،7 (2)، ص27–48.

الشيخ، ع وآخرون. (2024)، حل مشكلة البائع المتجول باستخدام الخوارزمية الجينية– دراسة تطبيقية على مركز المستقبل للتركيبات السنية، مجلة دراسات الاقتصاد والأعمال مصراتة، 1، عدد خاص، ص 205–224.

Al-Ibrahim, A. M. (2020). Solving Travelling Salesman Problem (TSP) by Hybrid Genetic Algorithm (HGA), International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 11(6), p 376 – 384.

Binjubier, Mm, Et al. (2024). A GPU Accelerated Parallel Genetic Algorithm for the Traveling Salesman Problem, Journal of Soft Computing and Data Mining (JSCDM), 5(2). p 137 – 150.

Dantzig, G.B., Fulkerson, D.R, &Johnson, S. M. (1954). Solution of a large – Scale Traveling – Salesman Problem, Journal of the operations Research Society of America, 2(4), 393-410.

Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley.

Holland, J. H. (1975). Adaptation Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press.

Jain. L., Bhanot. A. (2012). Traveling Salesman Problem: A Case Study, International Journal of Computer & Technology, 3(1), p 167 – 169. www.cirworld.com

Lawler, E. L., Lenstra, J.K., RinnooyKan, A.H., & Shmoys, D.B. (1985). The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization, Wiley.

Naufal, R,. Naufal, M. S. (2025). Optimization of Distribution Routes Using the Genetic Algorithm in the Traveling Salesman Problem, Journal of Applied Informatics and Computing (JAIC), 9(1), p 211 – 220.

Rafique, F., Gui, H., Hussain, A., Amin, S. (2026). Optimization of the traveling salesman problem through a genetic algorithm guided by self-organizing maps. Croatian Operational Research Review (CRORR), 17(2), p 181-193. http://www.hdoi.hr/crorr-journal

Rexhepi, A., Dika, A., & Maxhune, A. (2011). Solving TSP using Algorithms – Case of Kosovo, Advances in Computer Science, p256-260.

Rosada, E.F., (2026). Optimization of Social Visit Routes Using Traveling Salesman Problem (TSP) with Dynamic Programming Algorithm MATHHunesa: Journal Ilmiah Matematika, 14(2), p 72 – 80.