الإهداء

إلى كل من يحترم لغته ويعتز بها!!!

رجاء من كل قراء هذا الكتاب

الكتاب متاح لجميع القراء دون أى تكلفة وللاستفادة منه على أى وجه . فرجاء إذا رأيت عزيزى القارىء أنك قد استفدت منه فلا أطلب منك سوى الدعاء لمؤلفه إن كنت غير قادر ماديا، أما القارىء القادر ماديا فأطلب منه التبرع بما يستطيع لأى جهة خيرية يريد، وليكن على سبيل المثال مستشفى سرطانالأطفال 57357 بالقاهرة، أو مستشفى الكبد بالمنصورة، أو مستشفى القلب (مجدى يعقوب)بأسوان، أو هيئة مصر الخير، أو صندوق تحيا مصر، مع نية ثواب التبرع للمتبرع وللمؤلف.

المؤلف

أ.د.محمد ابراهيم العدوى

98eladawy@gmail.com

خواريزم مملكة النمل للوضع الأمثل

Ant Colony Optimization Algorithm

أ.د. محمد ابراهيم العدوى

مارس ٢٠١٧

استعراض الكتاب

الخوارزمات التى تحاكى الطبيعة nature inspired algorithms كثيرة ومنها الخوارزمات الجينية genetic algorithms على سبيل المثال والتى قدمناها فى كتيب سابق بالشرح المبسط والسهل تبحث عن القيمة المثلى لأى مشكلة يصعب إيجاد قيمتها المثلى بطريقة تحليلية. نقدم فى هذا الكتيب خواريزم محاكاة مملكة النمل ant colony algorithm فى الوصول إلى أقصر طريق بين عش أو مسكن النمل ومصدر الطعام، وهل هناك أفضل من النمل لكى يتعلم منه البشر. النملة وحدها لا تستطيع عمل شيء، ولكن النملة بالتعاون مع كل أفراد المملكة يستطيعون عمل الكثير. لذلك فإن هذا الخواريزم يصنف بأنه من الخواريزمات التشاركية cooperative أو التى تعتمد فى أساسها على التشارك أو التعاون بين أفراد المملكة للوصول إلى الوضع المثالى، على العكس من الخواريزمات التسابقية competitive التى تعتمد على التسابق بين أفرادها من أجل الوصول إلى الوضع المثالى، بحيث أن نظرية البقاء للأصلح تتجلى فى أقوى صورها فى هذه الخواريزمات والتى منها كما ذكرنا الخورايزمات الجينية. سنقدم فى هذا الكتيب البسيط كيفية عمل خواريزم محاكاة النمل ومكوناته وبرمجة ذلك باستخدام برنامج ماتلاب مع التطبيق على مسألة مندوب المبيعات traveler salesman problem, TSP الشهيرة والتى تعتبر علامة مميزة فى المقارنة بين خواريزمات الوضع المثالى. سنستعين بلغة ماتلاب كلغة برمجة لتنفيذ خواريزم النمل لما للغة ماتلاب من قدرات مهولة فى تبسيط الرسم والتعامل مع المصفوفات بسهولة وبأوامر مباشرة. يوجد للمؤلف كتاب فى مقدمة ماتلاب باللغة العربية منشور فى مكتبة جامعة الملك سعود بالمملكة العربية السعودية لمن يريد طريقة سهلة للدخول فى ماتلاب.

أ.د. محمد ابراهيم العدوى

mohamed_salama01@h-eng.helwan.edu.eg
98eladawy@gmail.com

خواريزم مملكة النمل

Ant Colony Algorithm, ACO

١- مقدمة

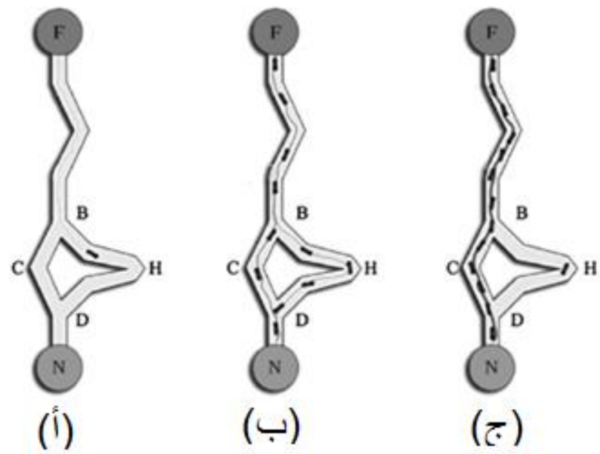
تعتبر النملة بمفردها مخلوقا بسيطا ضعيفا لا يستطيع عمل شيء ولا حتى إطعام نفسه، ولكنها فى المملكة تعتبر شيئا مهما جدا يستطيع عمل الكثير. النملة المفردة قد تدور حول نفسها فى دوائر لا تستطيع عمل شيء حتى تموت من التعب [Delsuc 2003]. يوجد فى مخ النملة المتوسطة حوالى عشرة آلاف عصب فقط، وهذا العدد غير كافى لعمل الكثير من المهام. ولكن كما نعرف فإن النمل يعيش فى مستعمرات يصل عدد النمل فيها إلى الملايين، وعلى ذلك فإن مستعمرة النمل التى بها مليون نملة سيكون لديها تقريبا عشرة بلايين من الأعصاب فى أمخاخها جميعا، وهذا الرقم يساوى تقريبا عدد الأعصاب فى المخ البشرى المتوسط. قد يبدو لنا لأول وهلة أن النملة تعمل بمفردها ولذلك فإننا ننظر إليها عادة على أنها مخلوق فائق القدرة [Holdober 2008]. لقد تم اكتشاف مستعمرة نمل فى عام ١٩٧٩ فى جزيرة يابانية تحتوى أكثر من ٣٠٠ مليون نملة تعيش فى أكثر من ٤٥٠٠٠ عش موصلة بين بعضها البعض [Holdober, 1990]. يعيش النمل فى كل مواقع وكل أجواء الأرض تقريبا حتى أن كتلة النمل الذى يعيش على الأرض يقدر بحوالى ١٥% من كتلة الحيوانات التى تعيش على الأرض [Shultz 2000]، وهذا شيء مهول لو فكرنا فيه قليلا من وجهة نظر صغر حجم النملة وقلة كتلتها. يقول متخصصوا دراسة سلوك النمل أن هناك حوالى ٨٨٠٠ نوع أو فصيل من النمل وأن عدد النمل على الأرض يصل إلى حوالى ١٠ أس ١٥ (10^{15}) نملة تعيش فى مستعمرات، وهذا يعنى ببساطة أن نصيب كل فرد من سكان العالم يصل إلى حوالى ١٥٠٠٠٠ (مائة وخمسون ألف) نملة!!. السؤال الذى يفرض نفسه هنا هو كيف استطاع هذا المخلوق الضعيف (النملة) أن يعيش ويبقى فى كل هذه الظروف وهذه الأجواء؟ إن العلماء يرجعون هذا النجاح والتكيف المعيشى للنمل على الأرض إلى هذا النظام المعيشى المجتمعى فى صورة مستعمرات.

يتواصل النمل بين بعضه البعض عن طريق مادة كيماوية تسمى الفيرومون تفرزها كل نملة على المسار الذى تسير فيه. وهذا يعنى أن النملة عندما تذهب إلى مكان الطعام وتحضره عائدة إلى عشها، فإنها تترك أثرا من هذه المادة الكيماوية على المسار الذى سارت فيه. بالتالى فإن النمل الآخر يشم هذا الأثر أو هذه المادة الكيماوية من خلال هوائيات شم خاصة فى كل منها وبالتالى فإنها ستتبع نفس المسار لتصل إلى الطعام فتحضره وتعود إلى العش، وبالتالى فإنها ستترك

هى الأخرى المزيد من الفيرومون على هذا المسار. معنى ذلك أن المسار سيتم تعزيزه بالمزيد من الفيرومون مع مرور المزيد من النمل عليه، ودائما يفضل النمل المسار الذى عليه فيرومون أكثر ليسير فيه، وبالتالى سيكون المسار المحتوى على أكبر كمية من الفيرومون هو أقصر مسار بين عش النمل ومكان الطعام، وهنا تكمن فكرة تقليدنا نحن البشر لطريقة تواصل النمل مع بعضه لوضع خواريزم نحصل منه على أقصر مسار من بين العديد من المسارات.

عندما تخرج النملة فلا تجد طعاما أو تجد عائقا يحول دون وصولها إلى الطعام، فإنها تستمر فى التجوال إلى أن تجد طعاما وعندها ستعود على نفس المسار الذى بدأت منه، إذا لم تعود على نفس المسار فإنها ستظل هائمة على وجهها ولن ترجع لنفس المسار وبالتالى فإن الفيرومون على المسار لن يزداد ولكنه سيتلاشى مع الوقت بفعل التبخير. بالتأكيد مع كثرة النمل السارح أو الباحث فإنه سينشأ مسار جديد إلى مصدر جديد للطعام. شكل ١ يبين صورة طبيعية لنمل يسير فى نفس المسار تقريبا نتيجة تراكم الفيرومون على نفس المسار. ربما يلاحظ أكثرنا أن النمل فى المطبخ يسير فى مسار موحد على بلاط الحائط، وإذا قمت أنت بمسح هذا الخط عند نقطة معينة فإنك ستلاحظ تشتت النمل بدرجة كبيرة.

شكل ١ صورة طبيعية للنمل حيث نلاحظ أن الجميع يسير فى مسار واحد من العش إلى مصدر الطعام والعكس. صورة من ويكيبيديا.



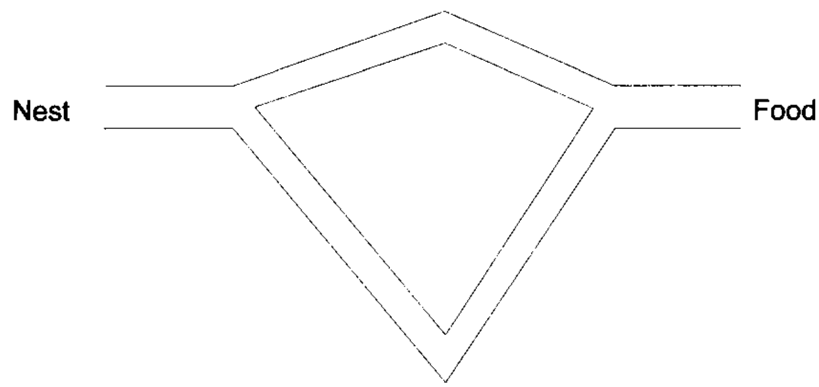
شكل ٢ (أ) نملة واحدة تكتشف المسار، (ب) بدأ النمل فى التدافع
مع احتمال دخول النمل فى المسار الأقصر C، (ج) مع الوقت
وبفعل الفيرومون يستقر النمل فى المسار الأقصر.

شكل ٢أ يبين نملة خرجت من العش N إلى مصدر الطعام F وأحضرت الطعام وعادت من نفس المسار من ناحية H كما نرى. بعد ذلك بدأ النمل يخرج فى نفس المسار إلى مصدر الطعام ولكن بالصدفة تم اكتشاف المسار C عن طريق واحدة من النمل كما فى الشكل ٢ب فبدأ هذا المسار الأقصر يجذب نمل أكثر وأكثر مع الوقت، إلى أن أصبح هو المسار الأساسى الذى يمر منه معظم النمل تقريبا كما فى شكل ٢ ج.

يستطيع النمل عمل الكثير من المهام الأخرى بجانب البحث عن أقصر طريق بين العش والطعام، حيث يستطيع النمل بناء شبكة من المسارات المعقدة تحت الأرض من أجل الحفاظ على مستعمرته. يوجد فى داخل مستعمرات النمل حجرات مخصصة لتخزين الطعام، وأخرى مخصصة للتزاوج، وأخرى للعناية باليرقات. إنهم يستطيعون عمل كبارى من أجسامهم على سطح الماء أو لعبور فجوات أرضية حتى يستطيع باقى النمل العبور عليها لنقل الطعام.

سنقدم فى هذا الكتيب كيفية محاكاة النمل فى وضع الفيرومون على مساراته من أجل الوصول إلى المسار الأمثل أو الحل الأمثل للعديد من المشاكل. لقد قام جوس ورفاقه [Goss et al, 1989] بتنفيذ بعض التجارب على النمل الأرجنتينى بجعله يسير فى مسارين أحدهما أقصر من الآخر، فوجدوا أنه فى معظم التجارب التى نفذوها كان ٨٠% من النمل يسلك المسار الأقصر. شكل ٣ يوضح رسما توضيحيا لهذه التجارب حيث نلاحظ أن المسار بين العش والطعام يتفرع إلى فرعين ثم يجتمع الفرعان مرة أخرى ليشكلا مسار واحدا ولكن أحد المسارين أطول بكثير من الآخر. مع وصول النمل عند تفريعة المسار فإنه فى البداية سيأخذ أحد المسارين بطريقة عشوائية، ولكن مع مرور الوقت فإن النمل الذى

سيأخذ المسار الأقصر سيعود إلى العش أسرع ومع مرور الوقت فإن تركيز الفيرومون على المسار الأقصر سيزيد مع الوقت بحيث فى النهاية سنجد أن معظم النمل إن لم يكن كله سيأخذ المسار الأقصر.



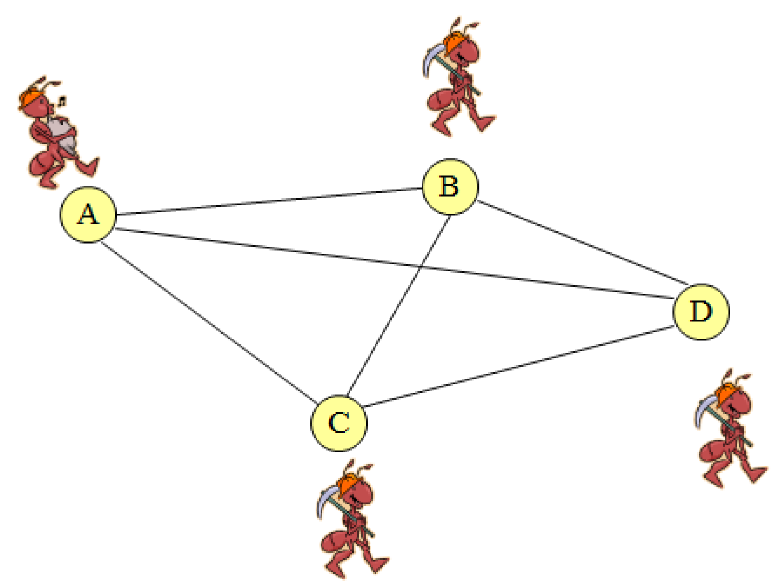
شكل ٣ محاكاة لتجربة جوس [Goss 1989] حيث وجد أنه فى ٩٥% من التجارب التى أجراها أن ٨٠% من النمل كان يسلك المسار الأقصر بين العش والطعام.

نلاحظ هنا وجود نوع من رد الفعل العكسى الموجب حيث مع زيادة الفيرومون على المسار الأقصر، فإن عدد أكبر من النمل سيمر من هذا المسار، وبالتالى يتسبب فى زيادة الفيرومون على هذا المسار، وبالتالى يجلب نمل أكثر، وهكذا. ظاهرة رد الفعل العكسى الموجب تعتبر موجودة تقريبا فى كل الخواريومات الارتقائية والتى من أهمها الخواريزمات الجينية. إن تزاحم النمل على المسار الأقصر مع مرور الوقت لهو أكبر دليل على أن الفيرومون الموجود على المسار يتبخر أيضا مع مرور الوقت وإلا لو لم يتبخر الفيرومون من على المسار الأطول وظل كما هو لظل النمل منقسما بين المسارين حتى النهاية، ولكن الذى يحدث أن الفيرومون على المسار الأطول يتبخر فيقل عدد النمل الذى يأخذ هذا المسار ويزيد على المسار الآخر، وهكذا إلى أن يتلاشى الفيرومون على المسار الأطول ويقل النمل الذى يأخذ هذا المسار بدرجة كبيرة. أول من استخدم خواريزم النمل كان طالب الدكتوراة الإيطالى [Dorigo et al 1996]. ونحن نرى أن أفضل تقديم لخواريزم النمل هو من خلال حل مشكلة مندوب المبيعات. هذه المشكلة تم حلها باستخدام الخواريزمات الجينية فى كتيب آخر باللغة العربية للمؤلف أيضا ويمكن الرجوع إليه للمقارنة بين الطريقتين.

٢- مشكلة مندوب المبيعات

مشكلة مندوب المبيعات تعتبر تقريبا هى حجر الأساس bench mark التى تستخدم فى تقييم كل خواريزمات البحث عن القيمة المثلى. تتلخص هذه المشكلة فى أن مندوب المبيعات يكون لديه عدد معين من المدن والمطلوب منه أن يزور كل هذه المدن ويرجع إلى المدينة التى خرج منها مرة ثانية على أن يزور كل مدينة مرة واحدة فقط وأن تكون المسافة

الكلية المقطوعة أقل ما يمكن. المشكلة هنا أن دالة المواءمة ليست تعبيرا حسابيا، ولكن دالة المواءمة هنا ستكون مجموع المسافات بين المدن فى المسار الذى سيأخذه مندوب المبيعات. بفرض أن لدينا خمس مدن مثلا وأن المندوب خرج من المدينة ١ إلى ٣ ثم إلى ٥ ثم إلى ٤ ثم إلى ٢ ثم إلى ١ مرة أخرى، فإننا سنجمع المسافات بين هذه المدن فى هذا المسار. بنفس الطريقة سنفرض كل المسارات الممكنة ونحسب مسافة كل مسار ونبحث عن المسار الذى له أقل مسافة. عدد المسارات الممكنة لأى عدد من المدن سيكون هو التباديل والتوافيق الممكنة لهذا العدد من المدن وهو يساوى مضروب هذا العدد. أى أنه لخمس مدن سيكون عدد المسارات الممكنة يساوى ١٢٠ مسارا وإذا كان عدد المدن يساوى ١٠ مدن فإن عدد المسارات الممكنة سيكون ٣٦٢٨٨٠٠ مسارا. أى أن عدد المسارات المطلوب البحث عن أقصر مسار فيها يكون عددا مهولا كلما زاد عدد المدن، وهنا يلعب خوارزيزم النمل دورا مهما كما سنرى. لاحظ أننا نفترض أن هناك مسارا موجودا من كل مدينة لجميع المدن الأخرى، وهذا ما نطلق كاملية التوصيل. كما أننا نفترض أيضا عند حل مسألة مندوب المبيعات بأن المسار من المدينة أ إلى المدينة ب على سبيل المثال يكون مساوى للمسار من المدينة ب إلى المدينة أ وذلك لتبسيط المسألة. طريقة حل المسألة باستخدام خواريزم النمل تتلخص فى أننا نفترض خروج نملة من أى مدينة عشوائية يتم اختيارها من بين المدن، حيث تقوم هذه النملة بالمرور على جميع المدن والعودة إلى المدينة التى خرجت منها مرة أخرى ويتم حساب هذا المسار الذى قطعته. يتم تكرار ذلك عدد من المرات إلى أن يتقارب الخواريزم على أقصر مسار كما سنرى. شكل ٤ يبين رسما توضيحيا لأربع مدن، A و B و C و D. عند تطبيق خواريزم النمل بهذه الطريقة لابد أن نضع بعض الافتراضات التى تختلف عن الوضع الطبيعى المتبع فى مستعمرة النمل، وهذه الافتراضات ستكون كالتالى:



شكل ٤ مسألة مندوب مبيعات مبسطة من أربع مدن

١- بفرض أن نملة خرجت من المدينة A، وبطريقة عشوائية ذهبت إلى المدينة D ثم المدينة B ثم المدينة C، ثم من C عادت إلى A. هذا المسار الكامل سنسميه رحلة. سنفترض هنا أن النملة ستترك أثرا من الفيرومون على المسار الذى سارت فيه فقط، وأما المسارات التى لم تمر منها فلن تترك عليها أى أثر من الفيرومون مثل المقطع من D إلى C مثلا الذى لم تمر به النملة فى رحلتها السابقة. يتم ذلك بالطبع لإعطاء ميزة للمسارات التى تمر بها النملة.

٢- كما ذكرنا فإن كل نملة ستبدأ عشوائيا من أحد المدن وتقوم برحلة تمر بها على جميع المدن وتعود إلى المدينة التى خرجت منها. كل رحلة من هذه الرحلات ستختلف عن الرحلات الأخرى من حيث الطول، ولابد من وضع آلية لتمييز الرحلات الأقصر. يتم ذلك عن طريق قياس مسافة الرحلة التى تقطعها النملة ثم يتم وضع الفيرومون على مسار الرحلة بعد الانتهاء من هذه الرحلة وذلك بقسمة كمية ثابتة من الفيرومون على طول مسافة الرحلة. ناتج هذه القسمة يتم إضافته إلى الفيرومون الموجود على كل مقطع من مقاطع مسار هذه الرحلة. بذلك نضمن أن المسار الأقصر عند قسمة كمية الفيرومون الثابتة عليه سيعطى كمية أكبر من الفيرومون يتم إضافتها على مقاطع هذا المسار، وبذلك نكون قد أعطينا ميزة للرحلات الأقصر. هذه الآلية كما نرى تختلف عن الطريقة الطبيعية لوضع الفيرومون فى حالة النمل الطبيعى حيث يتم وضع الفيرومون أثناء سير النملة، أما هنا فقد افترضنا أن الفيرومون لا تتم إضافته إلا بعد الانتهاء من كل رحلة وتقدير مسافتها ووضع الفيرومون بناء على هذه المسافة. هناك بعض الخوارزمات التى تفترض وضع الفيرومون بالطريقة الطبيعية أثناء سير النملة، ولكن ثبت بالتجربة أن هذه الخوارزمات ليست بنفس كفاءة الخوارزمات التى تضع الفيرومون بعد الانتهاء من الرحلة كما ذكرنا.

٣- النمل المستخدم فى الخوارزم وعلى العكس من النمل الطبيعى سنفترض أن له ذاكرة بحيث تتذكر النملة المسار الذى سارت فيه أثناء الرحلة وهذه الذاكرة تسمى taboo list. هذه الذاكرة ستكون لها عدة فوائد منها ١- ألا تعود النملة إلى مدن تكون قد زارتها مؤخرا فى أثناء الرحلة، و ٢- سنستفيد بهذه الذاكرة فى حساب المسافة الكلية للرحلة، و٣- سنستفيد بهذه الذاكرة فى وضع الفيرومون على كل مقطع من مقاطع المسار.

٤- كمية الفيرومون $\Delta\tau$ التى ستضعها النملة k على المقطع ij أثناء سيرها من المدينة i إلى المدينة j عند الزمن t وأثناء الرحلة T ستعطى بالعلاقة التالية:

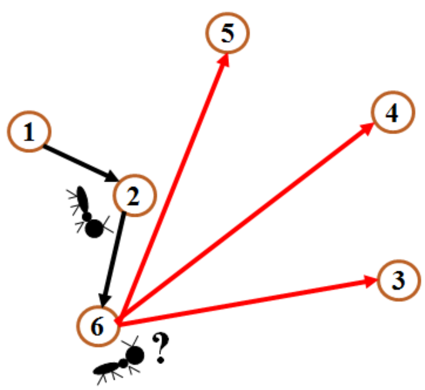
$$\Delta\tau_{ij}^{k}(t) = \begin{cases} \frac{1}{L^{k}(t)} & if\ (i.j)\epsilon T^{k}(t) \\ 0 & if\ (i.j) \notin T^{k}(t) \end{cases} \qquad (١)$$

لاحظ هنا أن k هى رقم النملة و L هو طول مسافة الرحلة T. وأن T^k هى الرحلة التى قطعتها النملة k وليست T أس k. نفس الشيء L^k هى طول مسافة الرحلة T التى قطعتها النملة k، وكذلك $\Delta\tau_{ij}^{k}(t)$ هى كمية الفيرومون الموضوعة على المقطع ij نتيجة مرور النملة k عليه من المدينة i إلى المدينة j عند الزمن t. نلاحظ أيضا من المعادلة (١) أن كمية الفيرومون التى تضعها أى نملة k، وهى $\Delta\tau_{ij}^{k}(t)$ تتناسب عكسيا مع طول مسافة الرحلة $T^k(t)$ وهى $L^k(t)$، حيث عندما تكون $L^k(t)$ كبيرة فإن $\Delta\tau_{ij}^{k}(t)$ ستكون صغيرة والعكس صحيح.

٥- مع توالى مرور النمل على المقاطع بين المدن فى مسارات مختلفة فإن كمية الفيرومون على كل مقطع ستزيد بمقدار $\Delta\tau_{ij}^{k}(t)$ مع مرور كل نملة، وسيتم تبخير كمية الفيرومون مع مرور الزمن بمعدل تبخير سنرمز له بالرمز ρ بحيث يمكن كتابة كمية الفيرومون على أى مقطع عند أى زمن t بالمعادلة التالية:

$$\tau_{ij}(t) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^{m} \Delta\tau_{ij}^{k}(t) \qquad (٢)$$

الكمية الأولى $(1-\rho)\tau_{ij}(t)$ تمثل الكمية المتبقية من الفيرومون على أى مقطع بعد أخذ تأثير التبخير، والكمية الثانية $\sum_{k=1}^{m} \Delta\tau_{ij}^{k}(t)$ تمثل كمية الفيرومون المضاف مع مرور كل نملة على هذا المسار. لاحظ أن t هنا تمثل الزمن وهى لن تكون متغيرا مستمرا كما نرى ولكنها ستمثل المحاولات أو الدورات المختلفة فى الخوارزيزم. الثابت m فى المعادلةالسابقة هى عدد النمل المستخدم فى كل دورة من دورات الخوارزيزم. معدل تبخير أو تناقص الفيرومون ρ يكون ثابت تفرض قيمته من صفر حتى ١. فى بداية الخوارزيزم توضع قيمة افتراضية صغيرة لكمية الفيرومون على جميع المقاطع تساوى $\tau_{ij}(0)$، كما يتم افتراض أن عدد النمل فى كل دورة من دورات الخوارزيزم يساوى عدد المدن المفترضة فى مسألة مندوب المبيعات.



شكل ٥ على النملة أن تقرر بعد الوصول إلى المدينة ٦ أن تقرر هل ستذهب إلى المينة ٣ أم ٤ أم ٥.

٦- عندما تصل أى نملة إلى المدينة i أثناء سيرها فى مسار معين، فإن عليها أن تقرر أى واحدة من المدن المتبقية ستذهب إليها. شكل ٥ يوضح ذلك، حيث أن النملة فى مسارها خرجت من المدينة ١ إلى المدينة ٢ ثم وصلت إلى المدينة ٦. عند المدينة ٦، على النملة أن تقرر، هل ستذهب إلى المدينة ٣ أم المدينة ٤ أم المدينة ٥، فأى واحدة ستختار؟

المدينة التى ستختارها النملة ستتوقف على طول المسافة لكل مدينة وعلى كمية الفيرومون على كل مقطع من هذه المقاطع وسيكون ذلك تبعا للمعادلة التالية:

$$p_{ij}^{k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^{\alpha}[\eta_{ij}]^{\beta}}{\sum_{l\epsilon N_i}[\tau_{il}(t)]^{\alpha}[\eta_{il}]^{\beta}} \qquad \forall j \in N_i \qquad (٣)$$

حيث $p_{ij}^{k}(t)$ هى احتمال أن تتحرك النملة k من المدينة i إلى المدينة j أثناء الدورة t من الخواريزم. $\tau_{ij}(t)$ هى كمية الفيرومون المتراكمة على المقطع ij عند الدورة t والتى تم حسابها بالمعادلة (٢). $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ هى معكوس مسافة المقطع ij. N_i هى مجموعة المدن المتبقية من الرحلة والتى من المفروض أن تنتقل النملة إلى واحدة منها من المدينة i، أى المناظرة للمدن ٣ و ٤ و ٥ فى شكل ٥. α و β هما ثابتان اختياران. من المعادلة (٣) يمكننا أن نلاحظ الملاحظات المهمة التالية:

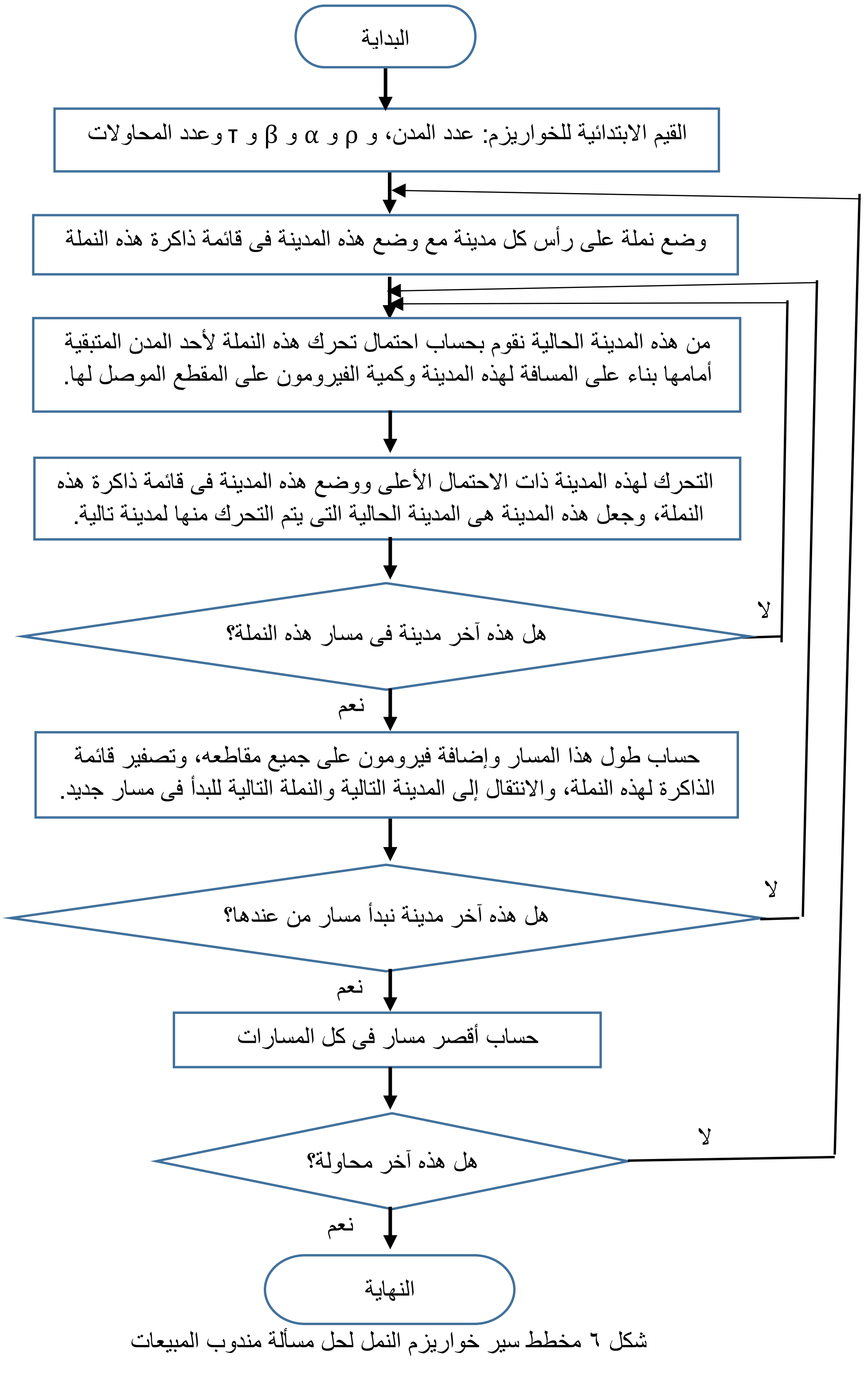
- أن البسط يساوى حاصل ضرب كمية الفيرومون المتراكمة على المقطع ij فى مقلوب مسافة المقطع ij بحيث كلما زادت كمية الفيرومون على هذا المقطع كلما زاد احتمال أن تسير النملة فى هذا المقطع، وأيضا كلما كانت مسافة هذا المقطع أقصر كلما كانت η_{ij} أكبر، وبالتالى يزيد احتمال أن تسير النملة فى هذا المسار أيضا.

- الثابتان α و β يتحكمان فى نسبة تأثير الفيرومون المتراكم على المقطع بالنسبة لتأثير طول هذا المقطع، فنلاحظ مثلا عندما تكون β=0 فإن احتمال اختيار النملة للمقطع الذى ستسير فيه سيتوقف فقط على كمية الفيرومون المتراكمة على هذا المقطع. وإذا كانت α=0 فإن اختيار النملة للمقطع الذى ستسير فيه سيتوقف فقط على طول هذا المقطع.
- المقام فى المعادلة (٣) يساوى مجموع حاصل ضرب نفس كمية الفيرومون المتراكم على كل مقطع فى طول كل مقطع وذلك بالنسبة لجميع المقاطع المتبقية من المسار أو التى من المحتمل أن تسير فيها النملة من المدينة i.
- أخيرا نلاحظ أن النملة ستختار المقطع الذى ستسير فيه بناء على نسبة حاصل ضرب الفيرومون المتراكم على هذا المقطع فى طول هذا المقطع (البسط فى المعادلة (٣))، بالنسبة لمجموع هذا المضروب على المقاطع التى من المحتمل أن تسير فيها النملة (المقام فى المعادلة(٣)).
- القيم المثلى للثابتين α و β هى ١ و ٥ على التوالى، وأما القيمة المثلى لمعامل التبخير ρ فهى ٠,٥ بناء على العديد من التجارب على هذا الخواريزم.[ ]

من كل ما سبق يمكننا أن نرسم مخطط السير لهذا الخواريزم كما فى شكل (٦). يمكن تلخيص هذا المخطط فى الخطوات التالية:

١- فى البداية يتم اختيار قيم البتدائية لثوابت الخواريزم مثل α=1 و β=5، و ρ=0.5، وعدد المحاولات التى يجب أن ننهى الخواريزم بعدها، ووضع كمية اختيارية ثابتة من الفيرومون على جميع المسارات حتى لا نبدأ الخواريزم بقيمة

صفرية للفيرومون. سنتخيل وضع نملة على رأس كل مدينة، حيث ستبدأ كل نملة من هذا المكان بعمل رحلة تمر بها على كل المدن وتعود إلى المدينة التى خرجت منها كالتالى.



شكل ٦ مخطط سير خوارزيزم النمل لحل مسألة مندوب المبيعات

٢- سنبدأ المخطط من المدينة ١ مثلا حيث تقف النملة ١ وترى أمامها باقى المدن. لا ننسى أن نضع المدينة الحالية فى قائمة ذاكرة النملة.

٣- نقوم بحساب احتمال انتقال النملة إلى واحدة من هذه المدن المتبقية وذلك باستخدام المعادلة (٣). تذكر أن هذه المعادلة تتوقف على كمية الفيرومون τ_{ij} الموجودة على المقطع (المسافة) الذى يصل بين الموضع الحالى للنملة والمدينة المراد التحرك إليها، وأيضا على طول هذا المسافة أو المقطع متمثلة فى الكمية $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$.

٤- بناء على الاحتمال المحسوب فى الخطوة ٣ تنتقل النملة إلى المدينة ذات الاحتمال الأعلى من بين كل المدن المتبقية، وتصبح هذه المدينة هى الموضع الحالى للنملة، ويتم إضافتها إلى قائمة ذاكرة النملة، والاستعداد للتحرك إلى مدينة جديدة.

٥- يرجع الخواريزم إلى الخطوة ٣ ويتم تكرار الخطوتين ٣ و ٤ إلى أن يتم الوصول إلى آخر مدينة فى المسار. هنا يتم إضافة المدينة التى خرجت منها النملة إلى المسار حتى يكون هناك مسار مغلق مثل المسار ١ و ٣ و ٥ و ٤ و ٢ و ١ مثلا فى حالة وجود خمس مدن.

٦- نحسب طول هذا المسار ونقسم عليه الكمية الثابتة من الفيرومون، ونضيف هذه الكمية من الفيرومون على كل مقاطع أو مسافات هذا المسار تبعا للمعادلة (٢). تذكر أننا نقسم كمية ثابتة من الفيرومون على طول المسار، وبالتالى كلما كان المسار أقصر كلما كانت كمية الفيرومون المضافة أكبر وكلما كانت مقاطع هذا المسار مفضلة للسير عليها من قبل النمل الآخر.

٧- بعد أن تستكمل النملة الحالية مسارها يعود الخواريزم إلى الخطوة ٢ ليبدأ مسارا جديدا من مدينة جديدة إلى أن ينتهى عند الخطوة ٦.

٨- يتم تكرار الخطوات من ٢ حتى ٧ حتى يتم الانتهاء من كل المدن. وبذلك يكون لدينا عدد من المسارات يساوى عدد المدن المتاحة.

٩- من كل هذه المسارات يتم البحث فيها عن المسار الأقل طول. ثم الذهاب إلى الخطوة ٢ للبدأ فى محاولة جديدة حيث يتم توطين نملة عند كل واحدة من المدن من جديد وتكرار الخطوات من ٢ حتى ٨ والحصول على أقصر مسار مع كل محاولة.

١٠- يتم توقيف الخواريزم بعد الحصول على المسار الأقل طول مع تكرار المحاولات عدد معين من المرات (وليكن ثلاث أو خمس مرات متتالية مثلا)، وهذا المسار سيكون هو المسار النهائى، أو أنه يتم الانتهاء من العدد المحدد للمحاولات، وهنا أيضا يكون المسار الأقل طول هو المسار النهائى، أو يتم إعادة الخواريزم مع زيادة عدد المحاولات.

البرنامج التالى هو تنفيذ لكل الخطوات السابقة باستخدام الماتلاب كلغة برمجة.

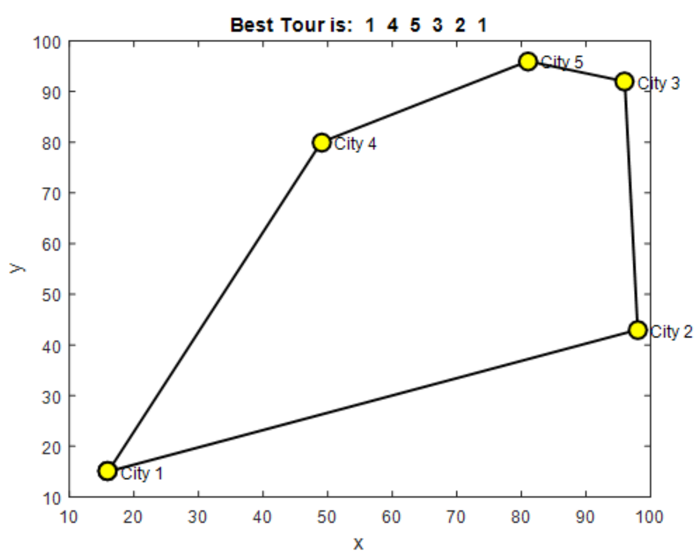
```
%main program for ACO applied to sales man problem [Mohamed Eladawy]. This
%program will use a function called "CreateModel.m". This program implement
%the flow chart in fig.6 and the previous steps from 1 to 10.
clc;
clear;
%% Ask for the number of cities.
st=input('enter no. of cities:  ','s');
NumberOfCities=str2num(st);
% Call a function file "CreateModel" to distribute the cities randomly in an
%area 100x100 units.
model=CreateModel(NumberOfCities);%to choose cities indices randomly
for k=1:NumberOfCities % numbering cities from 1 to NumberOfCities
     CityNumber(k)=k;
end
%% ACO Parameters and initial values
MaxIteration=10; % Maximum Number of Iterations
NumberOfAnts=NumberOfCities; % Number of Ants (Population Size)
tau0=10/(NumberOfCities*mean(model.D(:)));% Initial Pheromone
alpha=1;        % Phromone Exponential Weight
beta=1;         % Segment length Exponential Weight
rho=0.05;       % Evaporation Rate
eta=1./model.D;   % Heuristic Information Matrix
tau=tau0*ones(NumberOfCities,NumberOfCities);% initial Pheromone Matrix
% ACO Main Loop
TotalTourLengths=[];
for it=1:MaxIteration
    % Move Ants
    TourLengths=zeros(1,NumberOfCities);%Vector contain lengths of all tours
                                       %in each iteration
    AntTour=zeros(NumberOfCities,NumberOfCities+1);%matrix contain all tours
                        %done in each iteration
    %In each iteration, we assume that there is an ant will start a tour
    %starting from each one of the available cities.
 for j=1:NumberOfCities %this loop represent each ant on each city
    AntTour(j,1)=j;
    for k=2:NumberOfAnts-1 %this loop represent the tour by a single ant
        AntPosition=AntTour(j,k-1);%current position of the ant
        AntProb=zeros(1,NumberOfCities);%probability that an ant will move to
        % a next city
        for i=1:NumberOfCities
           temp=ismember(i,AntTour(j,:));
           if temp==1
               continue;
           end
         AntProb(1,i)=tau(AntPosition,i)^alpha*eta(AntPosition,i)^beta;
        end
        s=sum(AntProb(1,:));
        AntProb(1,:)=AntProb(1,:)./sum(AntProb(1,:));  % normalizing the
        %probabilities.
        [y,r]=max(AntProb(1,:));%y=max. value, r is element that contain
                                %this max value
        AntTour(j,k)=r;
        if k==NumberOfCities-1
           for i=1:NumberOfCities
              temp=ismember(i,AntTour(j,:));
              if temp==0
                 AntTour(j,k+1)=i;
```

```
                break;
            end
        end
    end
end
AntTour(j,NumberOfCities+1)=AntTour(j,1);% To close the tour
%disp(AntTour);
%% Calculation of tour length
L=0;
for i=1:NumberOfCities
    L=L+model.D(AntTour(j,i),AntTour(j,i+1));
end
TourLengths(1,j)=L;
%%Adding feromone on each segment of that tour
 for k=1:NumberOfCities
        p=AntTour(j,k);
        q=AntTour(j,k+1);
        tau(p,q)=tau(p,q)+Q/L;
 end
end
 TotalTourLengths=[TotalTourLengths TourLengths];
 %disp(AntTour);
 %disp(TourLengths);
 [MinLength,Best]=min(TourLengths);
 IterBestTour(it,:)=AntTour(Best,:);
 plot(model.x(IterBestTour(it,:)),model.y(IterBestTour(it,:)),'k-o',...
    'MarkerSize',10,...
    'MarkerFaceColor','y',...
    'LineWidth',1.5);
   xlabel('x');
   ylabel('y');
   for k=1:NumberOfCities
       text(model.x(IterBestTour(it,k))+2,model.y(IterBestTour(it,k))...
       ,['City ',num2str(IterBestTour(it,k))]);
   end
   title(['Best Tour is:  ',num2str(IterBestTour(it,:))]);
   disp(IterBestTour(it,:));
   disp(MinLength);
   %To stop the algorithm after getting the same shortest length of the
   %tour three consecutive iterations.
  if it>2
      temp=it-2;
      flag=0;
      for k=temp:it-1
          if IterBestTour(k,:)==IterBestTour(k+1,:)
              flag=1;
              continue;
          end
      end
      if flag==1;
          disp('Iterations='); disp(it);
          break;
      end
  end
end % End of program
```

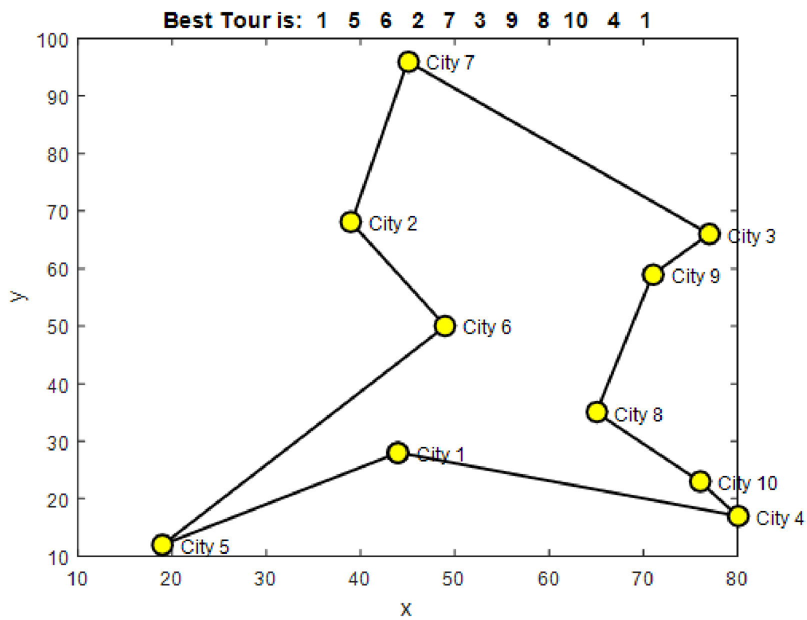
الدالة التالية تعمل على توزيع عدد المدن فى مساحة مقدارها ١٠٠×١٠٠ من الوحدات بطريقة عشوائية، حيث يتم النداء عليها فى بداية البرنامج السابق:

```
function model=CreateModel(NumberOfCities)
x=randi(100,1,NumberOfCities); % The x component of the cities
y=randi(100,1,NumberOfCities); % The y component of the cities
    %Calculation of distances between cities
    n=numel(x);
    D=zeros(n,n);
    for i=1:n-1
        for j=i+1:n
            D(i,j)=sqrt((x(i)-x(j))^2+(y(i)-y(j))^2);
            D(j,i)=D(i,j);
        end
    end
    model.n=n;
    model.x=x;
    model.y=y;
    model.D=D;
end
```

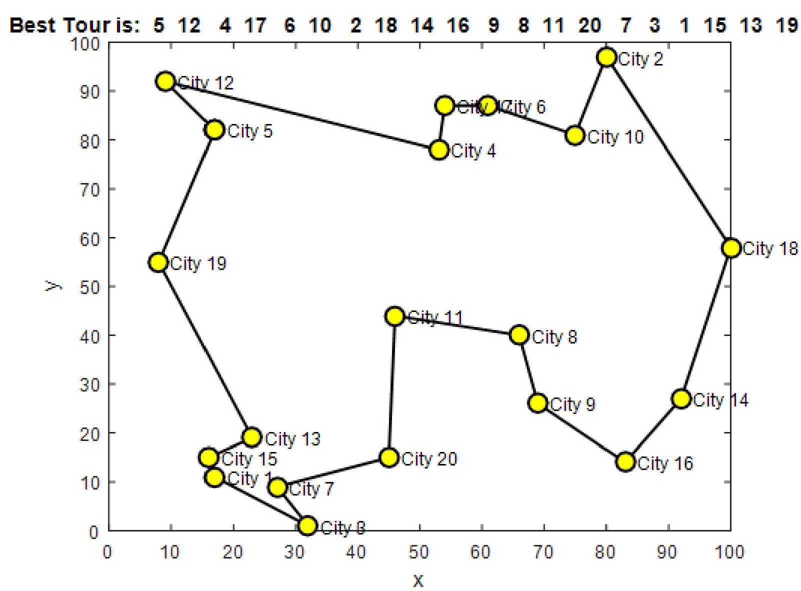
الأشكال ٧ و ٨ و ٩ توضح تنفيذ هذا البرنامج على ٥ و ١٠ و ٢٠ مدينة على التوالى. فى قمة كل شكل يكتب البرنامج تتابع المدن فى أقصر مسار تم الحصول عليه. فمثلا فى شكل ٧ أفضل مسار كان الذى يبدأ من المدينة ١ ثم ٤ ثم ٥ ثم ٣ ثم ٢ ثم المدينة ١ مرة أخرى.



شكل ٧ تنفيذ برنامج خوارزيزم النمل على ٥ مدن

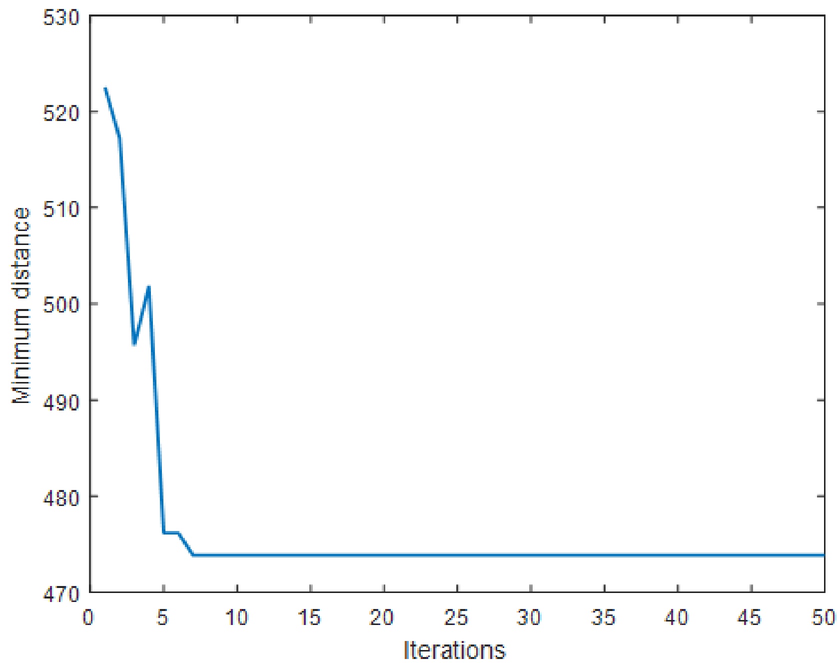


شكل ٨ تنفيذ برنامج خوارزم النمل على ١٠ مدن



شكل ٩ تنفيذ برنامج خوارزم النمل على ٢٠ مدينة

شكل ١٠ يبين تقارب الخوارزم إلى أقل مسافة بعد عدد معين من المحاولات.



شكل ١٠ تقارب الخواريزم إلى أقل مسافة بعد عدد معين من المحاولات

إلى هنا نكون قد انتهينا من تقديم خواريزم النمل الأساسى أو المبسط، وهناك الكثير من المتغيرات التى يمكن إضافتها إلى هذا الخواريزم من أجل الحصول منه على أداء أفضل. من ذلك مثلا استخدام الانتخاب elitism كما هو الحال مع الخواريزمات الجينية genetic algorithms حيث يمكن عند بدأ محاولة جديدة من تنفيذ الخواريزم أن يتم البدأ بالنملة ذات الحل الأفضل فى المحاولة السابقة، وألا يتم بموضع أو نملة عشوائية، أو التنفيذ بترتيب معين كما فى البرنامج السابق. يمكن أيضا تمثيل الطفرات فى خواريزم النمل كما كان الحال فى الخواريزم الجينى. هناك بعض أنظمة النمل التى تفترض وضع الفيرومون بعد انتقال كل نملة من مدينة إلى أخرى مباشرة ولا يتم الانتظار إلى الانتهاء من المسار. كل هذه عبارة عن متغيرات يمكن تجربتها ودراسة تأثيرها على تقارب وسرعة تقارب الخواريزم.

فى الطبيعة يوجد بعض أنواع من النمل التى تفرز أكثر من نوع من الفيرومون. مثلا، بعض النمل يفرز نوع آخر من الفيرومون عند وجود مهاجمين له فى أحد المسارات كتحذير للنمل الآخر من الدخول إلى هذه المسار. بعض الباحثين يرى أنه يمكن استخدام ذلك الفيرومون لوضعه على المسارات الطويلة لتحذير النمل الآخر من الدخول فى هذه المسارت.

المراجع:

1- Dan Simon "EVOLUTIONARY OPTIMIZATION ALGORITHMS" John Wiley & Sons, 2013.
2- Marco Dorigo and Thomas Stutzle "Ant Colony Optimization" The MIT Press, 2004.
3- Xinjie Yu · Mitsuo Gen, "Introduction to Evolutionary Algorithms", Springer, 2010.
4- Andreas Antoniou and Wu-Sheng Lu, "Practical Optimization: Algorithms and Engineering Applications", Springer, 2007.
5- Deneubourg, J.-L., Aron, S., Goss, S., and Pasteeis, J. (1990). The self-organizing exploratory pattern of the Argentine ant. *Journal of Insect Behavior*, 3(2): 159-168.
6- Goss, S., Aron, S., Deneubourg, J., and Pasteeis, J. (1989). Self-organized shortcuts in the Argentine ant. *Naturwissenschaften*, 76(12):579-581.
7- Hölldobler, B. and Wilson, E. (1990). *The Ants*. The Belknap Press of Harvard University Press.
8- Hölldobler, B. and Wilson, E. (1994). *Journey to the Ants*. The Belknap Press of Harvard University Press.
9- Hölldobler, B. and Wilson, E. (2008). *The Superorganism: The Beauty, Elegance, and Strangeness of Insect Societies*. W. W. Norton & Company.
10- Reinelt, G. (2008). TSPLIB. http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/