

الفصل الرابع

خوارزمية التلدين التجريبي

لتصميم شبكة الجي بي اس

1.4 مقدمة

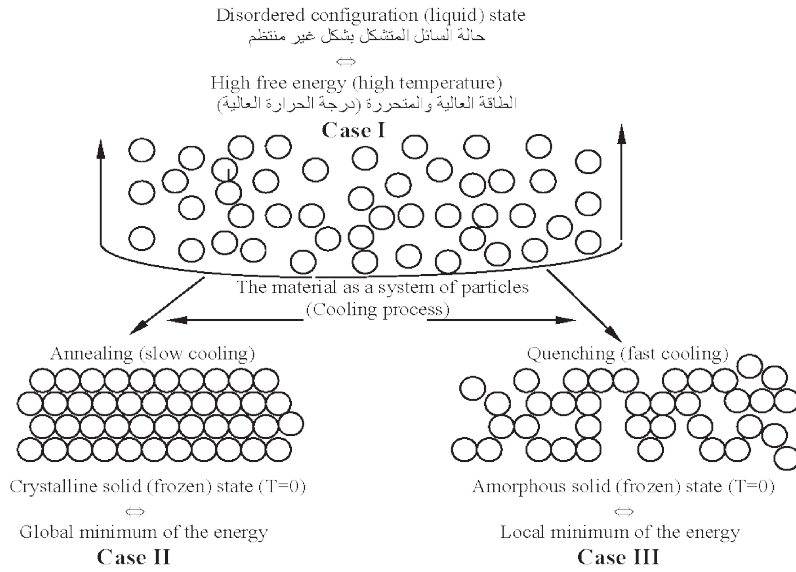
في هذا الفصل، ستم مناقشة طريقة التلدين التجريبي بشكل مفصل بالنسبة لشبكات الجي بي اس. وسيتم تبيان ومقارنة أوجه التقارب بين شبكة الجي بي اس كمسألة تجميع توافقية وطريقة التلدين التجريبي، مع عرض أداء هذه الطريقة على التطبيقات الأخرى. سيتم شرح وتطبيق طريقة استخدام التلدين التجريبي لإيجاد البرنامج الأقل كلفة لتنظيم العمل الحقلي لتصميم الشبكة. وأخيراً يتم التحقق من صحة نتائج وعمل هذه الطريقة باستخدام شبكات صغيرة نسبياً وذات برامج تنظيم عمليات مثالية ومحسوبة مسبقاً باستخدام الطرق الدقيقة.

2.4 أداء طريقة التلدين التجريبي وتطبيقاتها العملية:

كما ذكر سابقاً، يستند المفهوم العام للطرق التقريبية على البحث المناسب للفضاء البحثي لترتيب حلول المسألة وتشكيلها. حيث تتحقق طريقة التلدين التجريبي من هذا الفضاء بالمرور من ترتيب إلى آخر باستخدام طريقة أو إجراء تحول خاصة. ويمثل هذا الإجراء الإنتاج المستمر لسلاسل ماركوف (Markov Chains) في كل تحول باستخدام صيغة خاصة للقبول تسمى قانون محاكاة متروبوليس (Metropolis)، ومن هنا فإن مصطلح التلدين التجريبي يشير إلى اعتماد

هذه التقنية بالتزامن والاقتران مع التبريد (التصلب أو التلدين) لدرجة الحرارة.

إن الفكرة الرئيسية في هذه التقنية هو محاكاة عملية التبريد لمادة (مجموعة من الجزيئات)، شعاع قياس في سياق الجي بي اس، في مرجل حراري. يوضح الشكل 1.4 الشكل المادي (الفيزيائي) للخصائص الهيكلية للمادة في إطار عملية التبريد والذي يعرف باسم التصلب. على سبيل المثال، تبين الحالة (I) عملية الإذابة أو التميع لمادة صلبة (الكريستال) في مرجل حراري عن طريق زيادة درجة الحرارة إلى أقصى قيمة عالية والتي تجعل جميع الجزيئات المكوّنة للكريستال ترتب نفسها بشكل عشوائي في طور المرحلة السائلة. تبين الحالة (II) الوضعية (المشابهة للبرنامج الأقل كلفة لتنظيم العمل الحقلي لتصميم شبكة الجي بي اس) الناتجة بتطبيق التبريد البطيء جداً (التصلب)، بينما تبين الحالة (III) المخالفات والعيوب على نطاق واسع في التلدين البلوري (المشابه للبرنامج الأكثر كلفة لتنظيم العمل الحقلي لتصميم شبكة الجي بي اس) الناتجة بتطبيق التبريد السريع للحالة (I).



الشكل 1.4. التشكل المادي لحالات الكريستال (المتبلورة) والهشة (غير متبلورة) تحت تأثير عملية التبريد.

كما هو مبين أعلاه، من الملاحظ أن الوضعية المجمدة تتأثر وفقاً لمعدل تبريد جزيئات المادة السائلة. حيث تحاكي خوارزمية التلدين التجريبي التغير في الطاقة (التكلفة في سياق الجي بي اس) لهذه المادة عندما تتعرض

لعملية التبريد حتى تحولها إلى الوضعية المجمدة الثابتة (المشابهة للحالة التي لا يمكن الحصول على أي تحسن إضافي في التكلفة). تمّ استخدام طريقة مونتّي كارلو (Monte-Carlo MC) من قبل متروبوليس وآخرون (Metropolis, et. al., 1953) لتقدير التوازن الحراري لكريستال ما من أجل قيمة ثابتة لدرجة الحرارة T.

إن أساس طريقة التلدين التجريبي تنبثق من العلوم الفيزيائية (Physical Science) وبشكل خاص الميكانيك الإحصائي (Statistical Mechanics) في بداية الخمسينيات. بعد ثلاثين عاماً من ذلك، تطورت هذه الطريقة بشكل ملحوظ من خلال التطبيقات العملية للثرموديناميك الحراري (Statistical Thermodynamic) لأعمال ميتروبوليس (Metropolis) وأحرزت نتائج عظيمة لمسائل تجميعية توافقية مهمة جداً من الحياة العملية (Kirkpatrick et al., 1983), Cerny, (1985). إن المصدر الأساسي لهذه التقنية هي قوانين الديناميكا الحرارية التي تنص على أنه في درجة حرارة (T)، وإن احتمال حدوث زيادة في الطاقة يعطى بالعلاقة التالية:

$$(1.4) \quad P = \exp(-\Delta / k * T)$$

حيث (Δ) هو الفرق في تابع التكلفة (الطاقة) و (k) هو الثابت المادي المعروف باسم ثابت بولتزمان (Boltzmann's constant).

إن الفكرة الرئيسية لاعتماد محاكاة متروبوليس هو إنتاج سلاسل لحالات الكريستال (الاضطرابات) ومن ثم حساب التغير في الطاقة الناتجة من هذه المنظومة خلال سير مراحل عملية التبريد، أنظر (Aarts and Korst, 1989)، (Rene, 1993) (Dowsland, 1993). يبين الشكل 2.4 الإجراء العام لتطبيق هذه التقنية.

في سياق التحسين التوافقي، إن الكلفة الأقل لبرنامج تنظيم العمل الحقلي مماثلة للقيمة الدنيا لحالة الطاقة، ولذلك هناك الكثير من أوجه التشابه بين التحسين التوافقي وعمليات التصلب أو التلدين في الفيزياء (Hajek, 1985). تمّ استبدال ميزة التوازن الحراري بالتوازن المعتمد في عملية ماركوف حيث تمّ اقتراح سلاسل ماركوف كنماذج رياضية لطريقة التلدين التجريبي لإنتاج تراتيب

أو تشكيلات لمسألة مراد تحسينها وعن الزمن المعطى عند كل درجة حرارة، وهذه الطريقة تنتج حلاً ذا تحسين أعظمي (global optimum) باحتمال قبول ما. لتوضيح العلاقة بين أسلوب محاكاة الديناميكا الحرارية، وعمليات التحسين التوافقي وشبكة الجي بي اس.

- انتقاء برنامج تنظيم عمليات (V) معطى للشبكة.
- إنتاج برنامج تنظيم عمليات جديد (V') من خلال تطبيق تغيير صغير (اضطراب) للأشعة الزمنية التي تم اختيارها عشوائياً في (V).
- حساب $\Delta = V' - V$ الفرق بين قيمة التكلفة لجداول تنظيم العمليات أعلاه.
- إذا كانت قيمة Δ سلبية، يتم قبول برنامج تنظيم عمليات الجديد (V') وتستمر عملية الانتقال من البرنامج الجديد حتى يتم الحصول على برنامج بأقل كافة ممكنة.
- إذا كانت قيمة Δ موجبة، يتم قبول البرنامج الجديد وفقاً لتابع احتمال القبول الوارد في المعادلة (1.4)

الشكل 2.4 المفهوم العام لطريقة التلدين التجريبي

يبين الجدول 1.4 أوجه التطابق بين شبكة الجي بي اس كمسألة تحسين التوافقي وبين طريقة التلدين التجريبي. في هذا التشابه أعلاه، إن الحلول الممكنة لمسائل التحسين التجميعي تمثل حالات المادة (I, II, III) في الشكل 1.4. إن قيم دالة الكلفة للحلول تمثل مقدار الطاقة في حالات المنظومة. إن الطاقة ذات الحد الأدنى الأعظمي (Global Minimum Energy) تتجاوب (أو تقابل) الحل المثالي (التصلب)، في حين إن الطاقة ذات الحد الأدنى المحلي (Local Minimum Energy) تقابل الحل غير الجيد (التبريد) كما هو مبين في الشكل 1.4. عندما تكون درجة الحرارة الخارجية صفراً، فإنه لا توجد حالة تحول يمكن أن تؤدي إلى حالة ذات طاقة عالية. طالما أن درجة الحرارة ليست صفراً، فإن طريقة التلدين التجريبي تسمح بحدوث الحركات ذات الاتجاه صعوداً من حالة إلى أخرى على أن تبقى ممكنة تحت تحكم درجة الحرارة.

بتخفيض درجة الحرارة ببطء من مستوى الطاقة الحالي للمنظومة حتى الوصول إلى حالة تجمد، فإنه بالإمكان تجنب القيمة المحلية الصغرى (Local Minimum) وبالتالي الحصول على الكريستال القوي (باستخدام تشابه السوائل). لذلك من الواضح عند درجات الحرارة المرتفعة، يكون فقط مبدأ سلوك الحبوب الخشنة (Coarse Grain Behaviour) لدالة الهدف ذات أهمية بالنسبة لأساليب البحث. مع تناقص درجة الحرارة، يتم فحص ودراسة سلوك مبدأ الحبوب الدقيقة (Finer Grain Behaviour) لهذه الدالة والذي يؤدي في نهاية المطاف إلى الحصول على الحد الأدنى الأصغري أو الأعظمي (Local or Global Minimum) لدالة الهدف.

المكونات Components	الحالة السائلة Fluid analogy	شبكة الجي بي اس GPS (Network)
Parameters of the problem بارامترات أو معامل المسألة	System of particles منظومة الجزيئات	Observed sessions الأشعة الزمنية المرصودة
Feasible solutions الحلول الممكنة	States of the solid (Crystals) حالات المادة الصلبة (الكريستال)	Feasible schedules الجداول الممكنة لتنظيم العمليات
Objective function دالة الهدف	Internal energy of the states الطاقة الداخلية للحالات	Cost function دالة التكلفة
Optimal or "close" solution (heuristic solution) الحل المثالي (أو القريب من المثالي) (الحل الهيروستيكي أو التقريبي)	Minimum energy (frozen state) الطاقة الدنيا (حالة التجمد)	Cheapest schedule الأقل كلفة (approximate schedule) (البرنامج التقريبي)
Local search البحث المحلي	Change of state (rapid quenching) تغير الحالة (التبريد السريع)	Local neighbourhood مجموعة البرامج المجاورة محلياً للبرنامج الممكن
Control component عنصر التحكم	Temperature الحرارة	Temperature الحرارة

الجدول 1.4 أوجه التطابق والتشابه بين شبكة الجي بي اس كمسألة تحسين وبين طريقة التلدين التجريبي

أداء طريقة التلدين التجريبي ونجاحها في حل مسائل التحسين التوافقي

إن التلدين التجريبي طريقة لإيجاد الحد الأدنى أو القريب منه لدالة هدف ما ذات متغيرات كثيرة للعديد من مسائل التحسين التجميعي الكبيرة. هذه الطريقة التي تسمى «التبريد الإحصائي» (Van (Statistical Cooling SC) (Laarhoven and Aarts, 1988)، أو «الصعود الاحتمالي» (Probabilistic Hill Climbing) (Romeo and Sangiovanni-Vincentelli, 1985)، تتحول بشكل متقارب باتجاه الحل. تُظهر النتائج التجريبية بأن طريقة التلدين التجريبي قد أثبتت فعاليتها على مجموعة واسعة من هذه المسائل وأعطت نتائج جيدة جداً خصوصاً في مسائل تصاميم الحاسوب وغيرها من المجالات الأخرى وذلك عندما يتم تحديد دالة الهدف (التكلفة) بشكل مناسب.

3.4 استراتيجية طريقة التلدين التجريبي لتصميم شبكة الجي بي اس

تمّ في هذا الكتاب تطبيق طريقة التلدين التجريبي على شبكات الجي بي اس. خاصة بإيصال الحالة السائلة للجزيئات «الأشعة» إلى حالة الطاقة المنخفضة كإنتاج الكريستال القوي (برنامج جيد) والذي أخذ بعين الاعتبار في (Saleh and Dare, 1997c) وستشرح هنا. تتكون حالة التصلب بذوبان (تجميع) السائل (مجموعة من الأشعة) ثم تخفيض الحرارة (انقاص قيمة معامل التحكم) ببطء حتى تشكيل أقوى كريستال (البرنامج الأقل كلفة) (الشكل 1.4).

لكي يتم تطبيق طريقة التلدين التجريبي لتصميم شبكة الجي بي اس، فإنه يستلزم التأمين الصحيح والمناسب للمركبات الأساسية المكوّنة لهذه الطريقة. أولاً) الخيارات الخاصة بالجي بي اس وهي مجموعة العناصر المتعلقة بطبيعة شبكة الجي بي اس المرصودة وشكلها والتي تحدد الطريقة التي يتم بها نمذجة هذه الشبكة بحيث تنسجم مع إطار عمل طريقة التلدين التجريبي. وبعبارة أخرى، تتضمن هذه الخيارات: الفضاء البحثي المحيط $Q(V)$ ببرنامج تنظيم العمل الحقلية الممكن ومجموعة البرامج المجاورة له $I(V)$ ، تابع كلفة البرنامج $V(C)$ ، والطريقة التي يتم الحصول بها على البرنامج V . ثانياً) الخيارات العامة بالجي بي اس وهي مجموعة العناصر التي تحكم عمل طريقة التلدين التجريبي ذاتها، وهي مركبات مخطط التبريد (Cooling Scale): عامل التحكم بالحرارة

(T) وقيمتها الأولية للبدء، عامل تعديل الحرارة (F)، عدد العمليات التكرارية بين التخفيضات لكل درجة حرارة (L)، وشرط الإيقاف الذي بموجبه سيتم إنهاء عمل الطريقة. (Osman and Potts, 1989) (Reeves, 1993).

الأسئلة الرئيسية المتعلقة بطريقة التلدين التجريبي والتي تم اختبارها على أشكال مختلفة من الشبكات:

- كيف يتم اختيار التبادلات بين الأشعة المستخدمة ؟
- كيف يتم تحديد درجة الحرارة "معامل التحكم" وضبطها؟

الخيارات الخاصة بالجزيء بي اس

وهي مجموعة العناصر المتعلقة بطبيعة شبكة الجزيء بي اس المساحية المرصودة وشكلها والتي تحدد الطريقة التي يتم بها نمذجة هذه الشبكة بحيث تنسجم مع إطار عمل طريقة التلدين التجريبي، وتتكون من:

- البرنامج الأولي لتنظيم العمل الحقلي

يمكن إيجاد البرنامج الأولي V ذات الكلفة $C(V)$ لطريقة التلدين التجريبي يدوياً وذلك بالاعتماد على ذكاء وخبرة المهندس المصمم كما سيتم عرضه في الفصل 6 لشبكة مالطا وفي الفصل 7 لشبكة سيشيلز.

- بنية مجموعة البرامج المجاورة

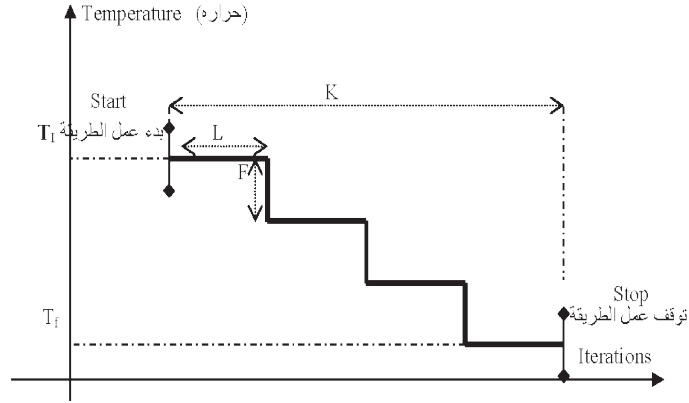
بعد انتقاء البرنامج الأولي (بشكل كفي أو إنشائي) تقوم طريقة التلدين التجريبي بتحسين هذا البرنامج من خلال إجراء بعض التغيرات المحلية (تبدل مواقع الأشعة المجاورة لبعضها البعض). يتم تشكيل مجموعة البرامج المجاورة والمشتقة من البرنامج الأولي بتغيير مكونات هذا البرنامج بتطبيق بعض الانتقالات الخاصة (Specific Move Types). اقترح الباحث Lin (1965) آلية تشكيل مجموعة البرامج المجاورة باستخدام أسلوب معامل $(\lambda-opt)$ المثالي المبني على تبادلات أقواس طريقة البائع المتجول (TSP)، حيث يمثل العامل (λ) عدد التبادلات الداخلية وهي في هذه الحالة تعطى القيمة (1).

تم في هذا الكتاب اعتماد الأسلوب ذاته المبني على تبادلات الأشعة للشبكة المراد تصميمها والذي يستخدم انتقالات خاصة تناسب عمل نظام الجزيء بي اس. إن البرامج المتشكلة (V_1, V_2, \dots, V_n) الناتجة بتطبيق منهجية المبادلة (Swap) على البرنامج المعطى (V) تسمى بمجموعة البرامج المجاورة للبرنامج

(V) وتعطى الرمز $I(V)$. ويحسب حجم هذه مجموعة بالمعادلة 2.4 كما يلي:

$$(2.4) \quad U(1-U) = I$$

يتم تقسيم المعادلة المذكورة أعلاه بنسبة 2 إذا كانت مصفوفة الكلفة الفعلية متماثلة (Symmetric)



الشكل 3.4 العناصر المحددة لمخطط التبريد.

الخيارات العامة بالجزي بي اس

تحكم هذه الخيارات عمل طريقة التلدين التجريبي ذاتها وهي مرتبطة بشكل رئيسي بمركبات مخطط التبريد (cooling scale). تمّ تبيان سلوك التوازن لعملية التصلب وتوصيفها باستخدام نظرية سلاسل ماركوف بشكل موسع ومفصل، انظر (Seneta 1981). إن إنشاء مخطط مقياس التبريد المناسب هو نوعٌ ما من عملية التجربة والخطأ. يعرض الشكل 3.4 المعاملات التي تحدد مدى احتمال قبول انتقال غير جيد كتابع للحرارة في أثناء تطبيق عملية التحسين، ويمكن تلخيصها على النحو التالي:

- درجة الحرارة البدائية (Initial Temperature, T_i)

في هذه الدراسة، إن درجة الحرارة ليست إلا عامل التحكم (Control Parameter) لضبط عمل طريقة التلدين التجريبي خلال مراحل تبادل القياسات الزمنية فيما بينها لإنتاج البرنامج الأقل كلفة لتنظيم العمل الحقلي. تعطى الحرارة الرمز T وهي عبارة عن عدد تتغير قيمته خلال المراحل المتعاقبة لعمليات التحسين وليس له

أي صفة فيزيائية. في بداية عمليات التحسين تكون قيمة T كبيرة مماثلة لدرجة الحرارة العالية للمادة في حالة الانصهار وهكذا يتم قبول الكثير من الانتقالات ذات الاتجاه صعوداً. وبعد ذلك تبدأ قيمة T بالنقصان المتدرج خلال سير عمليات التحسين وهذا ما يجعل من الصعب قبول المزيد من الانتقالات ذات الاتجاه صعوداً.

إن اختيار درجة الحرارة المناسبة هو جزء مهم لتحقيق نتيجة جيدة. ومع ذلك، إن القيمة العالية لدرجة الحرارة الأولية (T_i) يجب أن تضمن الوصول إلى جميع البرامج الممكنة باحتمال عال وذلك لمنع الوقوع في مطبات قيمة الدنيا المحلية (Local Minima). من ناحية أخرى، فإن درجة الحرارة النهائية (T_f) يجب أن تكون منخفضة بما فيه الكفاية لضمان الحصول على كافة التحسينات الممكنة في البرنامج الذي تم الحصول عليه وبالتالي لم يعد هناك إطلاقاً أي مجال آخر للبحث عن تحسينات أخرى (حالة التجمد). يتم الحصول على هذه المعلومات بإجراء دورة من حالات البحث المحلية التي تنتج المجال بين أكبر وأصغر تغيير في قيم دالة الكلفة. مثلاً، إن معدل التذبذب (التفاوت) الأولي (Initial Variation Average) للانتقالات ذات الاتجاه صعوداً (Uphill Moves) يمكن تقديره يدوياً بإجراء عدد من الانتقالات العشوائية (Random Moves) قبل بدء عمل طريقة التلدين التجريبي ذاتها. يعتمد الأسلوب المستخدم في تحديد هذه الانتقالات العشوائية على مساحة الشبكة المراد تصميمها وخبرة وذكاء المهندس المساحي.

سيتم في هذه الدراسة مناقشة هذين السؤالين الأساسيين حول مخطط التصلب، وهما:

- كم يجب أن تبلغ قيمة درجة الحرارة لشبكة الجي بي اس المراد رصدها (البرنامج الأولي) قبل البدء بالتصلب؟
- ما هو مقدار القيمة اللازمة لتبريد هذه الشبكة بحيث تنتج البرنامج الأقل كلفة؟

إن الإجابة على هذه الأسئلة تعتمد كلياً على نوع الشبكة المساحية المراد رصدها (مضلع مفتوح أو مغلق) (Traverse or Triangulation)، وكبر أبعادها قدر الإمكان.

-عامل تعديل الحرارة (Cooling Rate, F)

يشير هذا العامل إلى إنقاص درجة الحرارة الحالية (Tk) ومهمته تعديل وضبط سلوك عمليات التبريد خلال مراحل التحسين. إن المعدل الذي يتم فيه تقليل درجة الحرارة مهم جداً في تحقيق نجاح طريقة التلدين التجريبي. وهناك العديد من الطرق المستخدمة في تعديل تبريد درجة الحرارة بشكل متسلسل (Aarts et. al., 1984). قدم الباحث كونولي قانون تبريد غير متناسق (Non-Monotonic Cooling Rule) بحيث يتم تعيين (Reset) قيمة ما لدرجة الحرارة مرة واحدة فقط وهذا يحدث حالما تتشكل مجموعة برامج تنظيم العمليات المجاورة دون قبول أي انتقال (Connolly 1990). بعد هذا التعيين، تستمر محاولات البحث لعدد محدد مسبقاً من العمليات التكرارية وتحت تأثير درجة حرارة ثابتة. يمكن استخدام هذا القانون غير المتناسق للتبريد في المسائل التي تحتوي على مثالية خفيفة (Shallow Optima) (أي طوبولوجية ناعمة smooth a topology، انظر الشكل 4.4a). على كل حال، يمكن أن لا يحظى تطبيق هذا القانون بنجاح في المسائل التي تحوي قيمة دنيا محلية (Deep Local Minima) (أي طوبولوجية متنافرة أو وعرة Bumpy Topology، انظر الشكل 4.4b)، يُبين الشكل 8.4 هذا التطبيق غير الناجح للقانون المذكور لشبكة الجي بي اس في الشكل 7.4. يمكن مشاهدة أمثلة على تشكيل هذا التمثيل الطوبولوجي لقيم الكلفة في الشكل 2.6 لشبكة مالطا، وفي الشبكة 4.7 لشبكة سيشيلز.

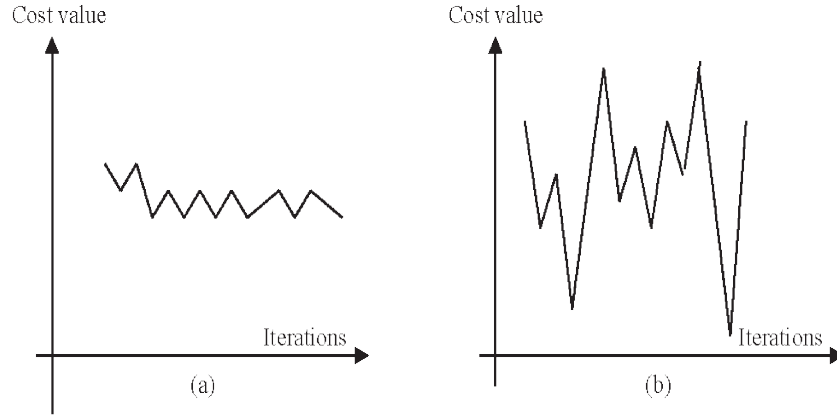
تمّ في هذه الدراسة اعتماد مخطط التبريد الهندسي (Geometric Cooling Scale) الذي يناسب الطبيعة الثابتة (Static Nature) لشبكة الجي بي اس المساحية باستخدام المعادلة 3.4 كما يلي:

$$(3.4) \quad T_{k+1} = F \cdot T_k$$

حيث (F) عامل تعديل الحرارة (قيمه صغيرة جداً لكنها قريبة من الواحد)

لا توجد طريقة أساسية لتشكيل قيم وحيدة أو ثابتة لتحديد مقدار التخفيض في درجة الحرارة في الدراسات المرجعية للبحث العملياتي. إن القيم التجريبية لعامل التعديل (F) الناتجة من تحليل شبكتي الجي بي اس في الفصول 6 و 7 هما 0.80 و 0.95، وهذه القيم المتوافقة مع بعض الدراسات المرجعية في هذا

المجال، انظر (Aarts and Van Laarhoven, (Kirkpatrick, et. al., 1983) (1985). في هذه الدراسة، تمّ تطبيق قانون تحديث درجة الحرارة المبيّن أعلاه الذي يعتمد على التغير في دالة الكلفة.



الشكل 4.4 التمثيل الطوبولوجي لقيم تابع الكلفة.

- عامل طول سلسلة ماركوف

يمثل عامل طول سلسلة ماركوف (Markov Chains, L) عدد الانتقالات المتكررة، بين تخفيضات درجة الحرارة، والمتشكلة عند قيمة درجة حرارة معطاة أو محددة مسبقاً. تحوي كل سلسلة من سلاسل ماركوف العدد ذاته من العمليات التكرارية الجزئية (Iterations) الموافقة لقيمة معينة للحرارة T خلال فترة زمنية ثابتة. يعتمد عادة عدد هذه العمليات المنفذة (أي عدد التبادلات المدروسة) على ضخامة برنامج التنظيم أو أحياناً على حجم مجموعات البرامج المجاورة، التي يمكن أن تختلف من درجة حرارة إلى أخرى (Osman, 1996). لذلك فإن عامل طول سلسلة ماركوف مهم ومباشر في تحديد عمل الطريقة. للحصول على نتائج جيدة فإنه مطلوب إجراء عمليات تكرارية كثيرة ولكن هذا يستلزم زمناً حسابياً أكبر. وهكذا يؤمن عامل طول سلسلة ماركوف منهجاً مباشراً ومرناً لتحقيق التوازن القسري في أساليب التحسين (Trade-Off) بين الزمن الحسابي للحصول على البرنامج وجودته. في هذه الدراسة، تمّ تطبيق سلسلة

ماركوف بطول ثابت (أي معدل التخفيض ثابت) والذي يناسب الطبيعة الثابتة لشبكة الجي بي اس.

عدد العمليات التكرارية

في معظم الحالات العملية، تُمثل هذه المعايير صيغة الإيقاف الشرط الذي يجب أن تتوقف عنده الطريقة عن العمل. وتوجد في بعض الدراسات المرجعية مجموعة من الصيغ والشروط المعتمدة لإيقاف عمل طريقة التلدين التجريبي (Stopping Criteria, K)، كالتى تعتمد على نوعية المسألة المراد معالجتها (Hajek, 1988). أولاً، صيغة إيقاف عمل الطريقة التى تعتمد على تنفيذ عدد ثابت من مراحل تخفيض درجة الحرارة (أي عدد محدد مسبقاً من العمليات التكرارية (Number of Iterations K) (Bonomi and Lutton, 1984). ثانياً، صيغة إيقاف عمل الطريقة التى تعتمد على تخفيض درجة الحرارة خلال تنفيذ تحسين دالة الكلفة للبرامج الناتجة. إذا كانت المجموعة الأخيرة من البرامج الناتجة تحوي نفس دالة الكلفة والموافقة لطول سلاسل ماركوف المتتالية (مثلاً، خمسة برامج) أي متماثلة، فإن الطريقة توقف عملها. إن معيار أو صيغة الإيقاف النهائية التى تمت مناقشتها هنا تتضمن الصيغتين المذكورتين أعلاه. إن هذه الصيغ أو المعايير التى تمّ تعريفها وتطبيقها في هذه الدراسة تعالج بعض العيوب المتأصلة في الصيغتين أعلاه وتتوافق مع طبيعة شبكة الجي بي اس.

التطبيق العملي لطريقة التلدين للجي بي اس

تمّ تصميم طريقة التلدين التجريبي للجي بي اس المستخدمة في هذا الكتاب وتطويرها بشكل رئيسي من الخبرة العملية ومتطلبات الجي بي اس. تعتمد مرحلة تشكيل مصفوفة الكلفة الأساسية على الدقة المطلوبة لإيجاد إحداثيات نقاط الشبكة والتي تلبي المتطلبات المساحية (Dare, 1995). مثلاً، إن انتقاء شعاع بحيث يغطي مسافة طويلة جداً سوف يُحسن أساليب التوجيه والقياس (Orientation and Scale)، بينما انتقاء أشعة قصيرة جداً سيحافظ على الدقة من خلال تقليل تأثير الأخطاء. يتطلب هذا الانتقاء إجراء بعض محاولات التجربة والخطأ (Trial-and-Error) قبل أن يتم

اتخاذ الخيار المناسب، ويكون للخبرة العملية وحس المهندس المساحي دوراً مهماً في تنفيذ هذا الانتقاء المناسب. إن الكلفة التقديرية لنقل جهاز الاستقبال بين نقطتين مساحيتين تتضمن الأسعار الحالية لاستخدام مركبات العمل الحقلي ويمكن أن تخضع للتعديل بسبب الظروف التي قد تؤثر على خطة العمل الموضوعية لتنفيذ كامل الأعمال المتعلقة بتصميم الشبكة. وبالتالي، يمكن أن يستخدم تابع الغرامة (Penalty Function) لتحقيق التوازن بين هذه الفروقات في الكلفة.

تتكون مرحلة إيجاد مصفوفة الكلفة الفعلية من تحديد الأشعة المراد رصدها والتي تعتمد على العدد المطلوب لأجهزة الاستقبال المستخدمة في رصد الشبكة المساحية. تتضمن مرحلة تحديد البرنامج الأولي الأسلوب المتبع لإنشاء هذا البرنامج والتي تبدأ بترتيب وتنظيم الأشعة المنتقاة للرصد والمعتمدة على الهدف من الشبكة المساحية (Dare, 1995). يمكن اعتبار هذه المرحلة كتمثيل لحل (برنامج تنظيم العمل الحقلي) شبكة الجي بي اس المساحية. يمكن تمثيل برنامج ممكن (V) لشبكة الجي بي اس بالشكل $\{V=V_1, \dots, V_n\}$ حيث يتضمن كل برنامج (V) مجموعة من الأشعة، والهدف إيجاد البرنامج الأقل الكلفة. تُمثل هذه المراحل لطريقة التلدين التجريبي الخيارات الخاصة بالجي بي اس (GPS-Specific Choices) والتي تكون فيها الخبرة العملية للمهندس المصمم دوراً مهماً في تنفيذ المراحل المذكورة أعلاه.

إن عناصر التحكم الأساسية لطريقة التلدين التجريبي للجي بي اس والتي تمثل المرحلة البدائية لعمل الطريقة، تتضمن تحديد معامل مخطط التبريد. يتم اختيار هذه المعامل بالاعتماد على المعلومات المتاحة حول الشبكة، والتي يمكن الحصول عليها بإجراء عدد من دورات بحث محلية. تؤمن هذه الدورات: المجال بين أكبر وأصغر تغيير في قيم دالة الكلفة، والعدد الإجمالي للبرامج الممكنة المتعلقة بحجم مجموعة البرامج المجاورة. يتم إنتاج هذه المجموعة بتطبيق الانتقالات من برنامج لآخر. في هذه الحالة، يتكون الانتقال من انتقاء التبادل الثنائي بين الأشعة (أي تبديل مواضع شعاعين في البرنامج الأولي).

تسمح مرحلة الانتقاء والقبول أحياناً بقبول الانتقالات ذات الاتجاه صعوداً (Uphill Moves) وفقاً لبعض الاحتمالات الخاصة التي يتم تحديدها تبعاً لتحديث درجة الحرارة في مخطط التبريد الهندسي. يتم دائماً قبول الانتقالات

ذات الاتجاه نزولاً (Downhill Moves) كما في طريقة البحث المحلي المتقارب (LSD).

تعتمد مرحلة التحديث على مجموعة من القوانين: معامل مخطط لتبريد (Cooling Scale Parameters) المستخدمة في المرحلة (4) وذلك فيما إذا تمّ الحصول على قيمة تحسينية في المرحلة (6)، أو فيما إذا تمّ إجراء عمليات البحث الشامل لمجموعة الجداول المجاورة. بالنسبة لمرحلة الإيقاف فإنه يمكن تنفيذها كفيلاً والتي تبين الزمن المستغرق لتصميم كامل الشبكة. تُنهي الطريقة عملها عندما تكون قيمة الكلفة للمجموعة الأخيرة من البرامج المتتالية هي ذاتها (أي لا يوجد تحسين ملحوظ في كلفة البرنامج).

4.4 اختبار أداء طريقة التلدين التجريبي للجبي بي اس

من المفضل دائماً في تطبيقات الطرق التقريبية اختبار وتقييم فعالية نجاح هذه الطرق المقترحة بمقارنة حلولها مع حلول مثالية معروفة. توجد بعض البرامج المثالية ذات الحلول المعروفة والمحسوبة مسبقاً باستخدام الخوارزميات الدقيقة لتصميم الشبكات الطبوغرافية ذات الأبعاد المتوسطة والصغيرة نسبياً. إن الحلول القريبة من المثالية الناتجة باستخدام طريقة التلدين التجريبي لها النتائج ذاتها كما في الخوارزميات الدقيقة. يهدف هذا الجزء إلى تقييم فعالية طريقة التلدين التجريبي المطبقة على شبكات طبوغرافية متنوعة صغيرة وكبيرة وذات أشكال مختلفة. تمّ تطبيق هذه الطريقة في كافة مراحل تصميم الشبكة كطريقة بحث محلي باستثناء مرحلة تحديد الحل الأولي. تمت مقارنة النتائج الحاصلة من هذه الطريقة بالنتائج المتعلقة ببرامج مثالية معروفة ومحسوبة باستخدام طريقة البائع المتجول (TSP) للشبكات ذاتها (Dare 1995). إن الهدف من ذلك مقارنة أداء الطريقة بالنسبة لجودة الحل. من أجل تقدير جودة البرامج الناتجة بالطرق التقريبية، تم تحديد مقدار الانحراف المئوي النسبي (Deviation, RPD Relative Percentage) لقيمة البرنامج الناتج من تطبيق هذه الطرق عن قيمة البرنامج المثالي للشبكة ذاتها. يتم استخدام مقدار الانحراف المئوي النسبي (RPD) ليقرر جودة البرامج الناتجة بالطرق التقريبية. يتم حساب مقدار هذا الانحراف بالنسبة للبرنامج المعروف كما يلي:

$$RPD = \left\{ \frac{\text{heuristic schedule} - \text{best known schedule}}{\text{best known schedule}} \right\} \times 100$$

- البرنامج الناتج من تطبيق الطريقة التقريبية Heuristic Schedule

- البرنامج المعروف والمحسوب بدقة Best Know Schedule

في كلا الحالتين الدراسيتين، البرنامج المثالي والبرنامج الناتج بطريقة التلدين التجريبي لهما قيمة الكلفة ذاتها وبالتالي فإن قيمة الانحراف المئوي النسبي مساوية للصفر (RPD=0).

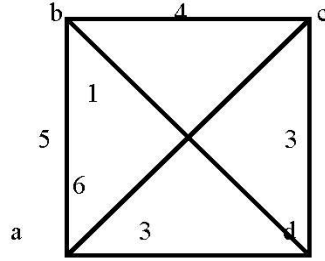
مثالي بقيمة 13 دقيقة. يعرض الشكل 7.4 هذه الشبكة المؤلفة من 6 قياسات (6=U)، 4 نقاط (4=N) وجهازين استقبال (2=R). يمكن مشاهدة مصفوفات الكلفة الأساسية (original) والفعلية (actual cost matrix) في الجدولين 2.4 و 4.3. تم اختيار البرنامج الأولي للبدء (V1) عشوائياً بقيمة 17 دقيقة ويتكون من الأشعة التالية Ua-b، Ua-c، Ua-d، Ub-d، Uc-d، Uc-b.

	N _a	N _b	N _c	N _d
N _a	0	5	6	3
N _b	5	0	4	1
N _c	6	4	0	3
N _d	3	1	3	0

الجدول 2.4 مصفوفة الكلفة الأساسية للشبكة في الشكل 7.4 (Dare، 1995)

	U_{a-b}	U_{b-c}	U_{c-d}	U_{d-a}	U_{a-d}	U_{d-c}	U_{c-b}	U_{b-a}	U_{b-d}	U_{d-b}	U_{a-c}	U_{c-a}
U_{a-b}	0	5	6	4	1	4	6	0	5	3	4	6
U_{b-c}	4	0	4	6	4	1	0	6	3	2	4	6
U_{c-d}	6	2	0	3	6	0	1	3	2	3	6	3
U_{d-a}	5	6	3	0	0	6	5	1	3	5	6	2
U_{a-d}	1	5	6	0	0	3	6	5	5	3	2	6
U_{d-c}	3	1	0	6	3	0	2	6	3	2	3	6
U_{c-b}	6	0	1	4	6	4	0	4	2	3	6	4
U_{b-a}	0	6	4	1	4	6	5	0	3	5	6	4
U_{b-d}	4	2	4	3	4	2	4	3	0	0	4	4
U_{d-b}	3	4	2	4	3	4	2	4	0	0	4	4
U_{a-c}	2	5	6	6	3	3	6	6	5	3	0	0
U_{c-a}	6	6	3	3	6	6	5	2	3	5	0	0

الجدول 3.4 مصفوفة الكلفة الفعلية في الشكل 7.4 (Dare, 1995)

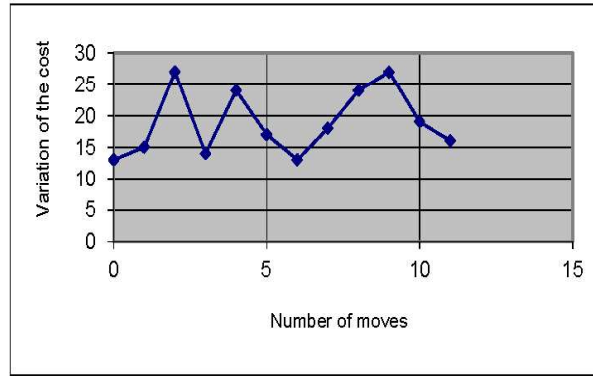


الشكل 7.4. شبكة مساحية بأربع نقاط. (Dare 1995)

يستلزم التطبيق الفعّال لطريقة التلدين التجريبي لتصميم شبكة الجي بي اس في الشكل 7.4 معرفة بعض «المعلومات الداخلية» المهمة حول هذه الشبكة وذلك لتحديد معامل التلدين الأولية. هذه المعلومات مثلاً، مجال برنامج تنظيم العمل الحقلّي لرصد وتصميم الشبكة كالفرق بين أكبر وأصغر تغيير في قيم دالة الهدف (الكلفة) وعدد البرامج الممكنة المتعلقة بحجم مجموعة البرامج

المجاورة للبرنامج الحالي. تمّ الحصول على هذه المعلومات الداخلية مسبقاً عن طريق إجراء 12 دورة بحث محلية على البرنامج الأولي (الشكل 8.4).

تمّ تحديد قيم درجة الحرارة الأولية ($T_i = 27$) والنهائية ($T_f = 13$) بحيث تساويان أكبر وأصغر قيمة لدالة الكلفة واللّتين تمّ إيجادهما باستخدام دورة بحث محلية. إن هذه الطريقة المستخدمة في تحديد قيم درجة الحرارة تعمل بشكل فعّال فقط بالنسبة للشبكات ذات الأبعاد الصغيرة، ولكن بالنسبة للشبكات ذات الأبعاد الكبيرة تمّ تطبيق طريقة عملية بنجاح كما هو مبين في الفصل الخامس لشبكة مالطا والفصل السادس لشبكة سيشيلز.



الشكل 8.4. التغير الطوبولوجي لقيم الكلفة للشبكة في الشكل 7.4.

بعد الحصول على قيم درجة الحرارة الأولية والنهائية (T_i و T_f)، سيتم توصيف وشرح طريقة التلدين التجريبي للجزي بي اس بالتفصيل في المرحلة المقبلة. في البداية سيتم عرض ملخص النتائج. بتطبيق هذه الطريقة على البرنامج الأولي، يلخص الشكل 9.4 توزيع قيمة المتحول العشوائي (θ Generated Random Number) ومعادلة القبول الاحتمالي (Acceptance Probability Function) لكل عملية تكرارية. تمثل كلفة كل برنامج قيمة الزمن الواجب تخفيضه مع الاحتفاظ بقيمته الحالية ($\{C (V_{current})\}$) خلال العمليات التكرارية المتتالية.

إن صيغة إيقاف العمل المعتمدة (والتي ليست درجة الحرارة النهائية T_f التي تمّ تعيينها مسبقاً من قبل المستخدم في بداية عمليات التبريد) تمّ تحقيقها

عندما كانت قيمة الكلفة متماثلة بالنسبة للبرامج الأخيرة المتتالية، أي لا يوجد أي تحسين في قيمة الكلفة وهذا ما حدث عندما توقفت طريقة التلدين التجريبي عند الحرارة ($T_{stop} = 3.14$). بشكل أدق، حالما تصبح درجة الحرارة الحالية مساوية لدرجة الحرارة النهائية ($T_k = T_f$)، فإن طريقة التلدين التجريبي يجب أن تتوقف عن العمل. علاوة على ذلك، وعند هذه المرحلة، قد تستمر أساليب التحسين مصحوبة بدورات بحث شاملة عن البرنامج النهائي الحالي حتى النقطة التي لم يعد عندها بالإمكان الحصول على أي مزيد من التحسين، وتسمى درجة الحرارة التي يحدث عندها ذلك بدرجة حرارة التوقف (T_{stop}).

M	Obtained schedule	CC	BFC	Δ	θ	$e^{-\Delta/T}$
1	$(U_{a-b})(U_{a-c})(U_{a-d})(U_{b-d})(U_{c-d})(U_{c-b})$	17	17	0	0.658	1
2	$(U_{a-c})(U_{a-b})(U_{a-d})(U_{b-d})(U_{c-d})(U_{c-b})$	13	13	-4	0.464	2.718
3	$(U_{a-d})(U_{a-c})(U_{a-b})(U_{b-d})(U_{c-d})(U_{c-b})$	14	14	+1	0.746	0.779
4	$(U_{b-d})(U_{a-c})(U_{a-d})(U_{a-b})(U_{c-d})(U_{c-b})$	15	15	+1	0.303	0.779
5	$(U_{c-d})(U_{a-c})(U_{a-d})(U_{b-d})(U_{a-b})(U_{c-b})$	24	15	+7	0.421	0.105
6	$(U_{c-b})(U_{a-c})(U_{a-d})(U_{b-d})(U_{c-d})(U_{a-b})$	24	15	+7	0.190	0.105
7	$(U_{a-b})(U_{a-c})(U_{a-d})(U_{b-d})(U_{c-d})(U_{c-b})$	17	15	-2	0.531	0.606
8	$(U_{a-b})(U_{a-d})(U_{a-c})(U_{b-d})(U_{c-d})(U_{c-b})$	13	13	0	0.024	2.720
9	$(U_{a-b})(U_{b-d})(U_{a-d})(U_{a-c})(U_{c-d})(U_{c-b})$	18	13	5	0.115	0.287
10	$(U_{a-b})(U_{c-d})(U_{a-d})(U_{b-d})(U_{a-c})(U_{c-b})$	27	13	14	0.277	0.105
11	$(U_{a-b})(U_{c-b})(U_{a-d})(U_{b-d})(U_{c-d})(U_{a-c})$	27	13	4	0.553	0.105
12	$(U_{a-b})(U_{a-d})(U_{a-c})(U_{b-d})(U_{c-d})(U_{c-b})$	13	13	0	0.738	3.490
13	$(U_{a-b})(U_{a-c})(U_{a-d})(U_{b-d})(U_{c-d})(U_{c-b})$	17	13	4	0.747	0.368
14	$(U_{a-b})(U_{a-c})(U_{b-d})(U_{a-d})(U_{c-d})(U_{c-b})$	20	13	7	0.695	0.174

الجدول 5.4 مجموعة البرامج الناتجة بتطبيق طريقة التلدين التجريبي عند درجة حرارة التوقف ($T_{stop}=3.14$).

إن الرموز المستخدمة في الجدول أعلاه هي كما يلي:

M : عدد الانتقالات.

CC : الكلفة الحالية.

BFC : أفضل كلفة تم الحصول عليها.

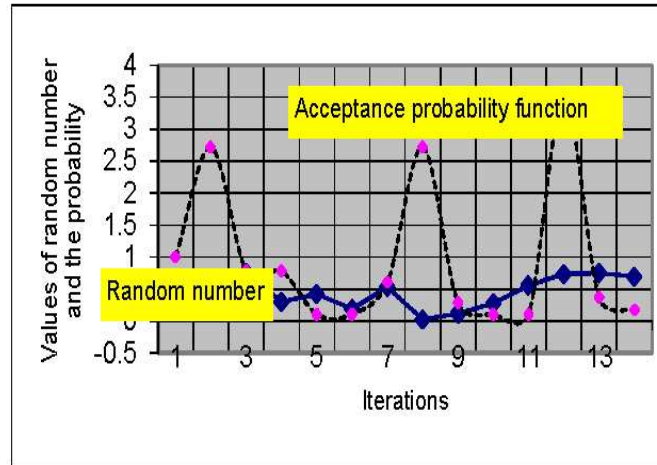
Δ : الفرق في الكلفة.

θ : القيمة العددية للمتحول العشوائي.

$e^{-\Delta/T}$: معادلة القبول الاحتمالي.

T_{stop} : قيمة درجة الحرارة التي يتوقف عمل طريقة التلدين التجريبي ويتم تحديدها بعمليات التبريد.

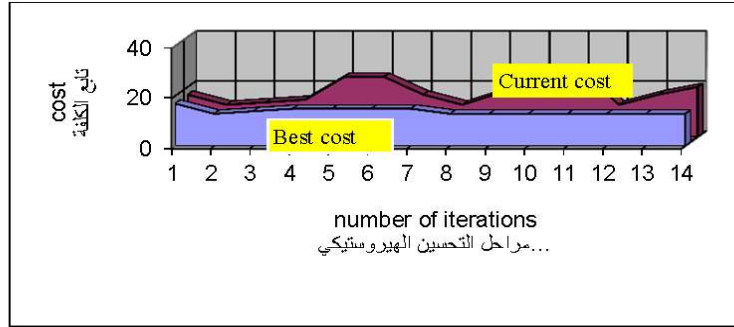
T_f : درجة الحرارة توقف التي يتوقف عمل طريقة التلدين التجريبي عندها ويتم تحديدها من قبل المستخدم.



الشكل 9.4 توزع القيمة العددية للمتحول العشوائي ومعادلة القبول الاحتمالي بالنسبة لكل عملية تكرارية.

يلخص الشكل 10.4 الرسم التخطيطي للتحويل السريع لطريقة التلدين التجريبي بالنسبة لهذه الشبكة نحو أفضل قيمة. أيضاً يوضح الشكل ذاته جودة البرنامج الحالي والبرنامج الناتج تقريباً منسوباً إلى عدد العمليات التكرارية لطريقة التلدين التجريبي التي مرت بثلاث مثاليات محلية (Local Optima) عند العمليات التكرارية 2 و 8 و 12. توقفت أساليب التحسين ودورات البحث للطريقة عندما تحقق شرط الإيقاف وهذا واضح جلياً في الأشكال 10.4 و 11.4. يبين الشكل 11.4 التمثيل التخطيطي للأداء الناجح لطريقة التلدين التجريبي.

في هذا الشكل تمثل V1 البرنامج الأولي، و V2 البرنامج ذات المثالية المحلية، و Vcheapest البرنامج ذات المثالية العظمى أي الأقل كلفة، بينما تمثل Q(V) الفضاء البحثي، و I(V) مجموعة البرامج المجاورة للبرنامج الأولي.



الشكل 10.4. الشكل التخطيطي لبرنامج العمل الحالي وأفضل برنامج عمل ناتج عن تطبيق طريقة التلدين التجريبي لتصميم الشبكة في الشكل 7.4.

سيتم حالياً شرح كل عملية تكرارية بالتفصيل. وفي هذا المثال تم تطبيق الإنشاء البحثي لمجموعة البرامج المجاورة المتتالية (Sequential Neighbourhood Search Structure) لإنتاج البرامج المجاورة للبرنامج الحالي، كما تم شرحه في الجزء 8.3، وأعطى نتائج جيدة كما سيعرض في العمليات التكرارية التالية. تمثل الأرقام الموجودة في الأقواس [] في البرنامج الأولي كلفة الانتقال من رصد شعاع آخر ويمكن الحصول عليها من مصفوفة الكلفة الفعلية في الجدول 3.4. تمثل العمليات التكرارية التالية عمليات التبريد المستخدمة من قبل طريقة التلدين التجريبي للجبي بي اس لإيجاد أفضل برنامج ممكن.

العملية التكرارية الأولى (البرنامج الأولي للبدء)

إن قيمة البرنامج الأولي للبدء V1 تساوي 17 دقيقة. في البداية يتم وضع عداد التكرار (Iterations counter) للعمليات التكرارية على قيمة الصفر مما يدل على عدم حصول أي انتقالات منذ بدء عمليات التحسين.

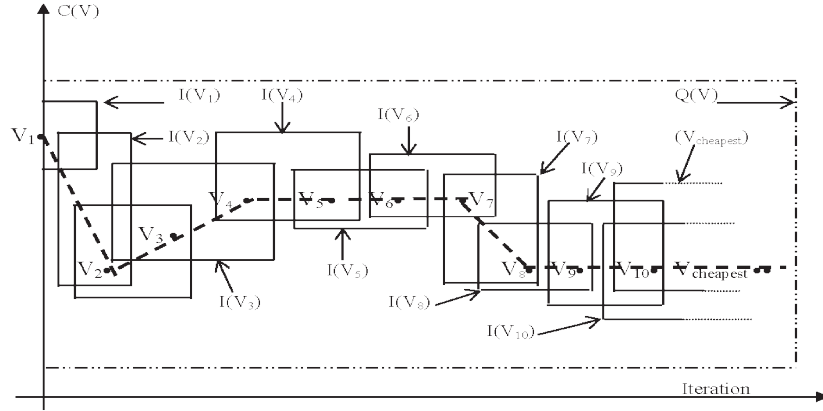
$$V1=(Ua-b)-[4] \rightarrow (Ua-c)-[3] \rightarrow (Ua-d)-[5] \rightarrow (Ub-d)-[4] \rightarrow (Uc-d)-[1] \rightarrow (Uc-b) = \{17\}$$

في العملية التكرارية الأولى (**Iteration 1**)، تكون قيم كلفة البرنامج الحالي والبرنامج الناتج عن الطريقة التقريبية متساوية. إن أفضل قيمة تمّ الحصول عليها تعني الكلفة التي تمّ قبولها بطريقة التلدين التجريبي للجزي بي اس، وتأخذ الرمز $C(V_{best})$ خلال العمليات التكرارية التالية وذلك ليتم تمييزها من الكلفة الحالية التي تُعطى الرمز $\{C(V_{current})\}$.

العملية التكرارية الثانية

تبدأ طريقة التلدين التجريبي بتشكيل البرنامج المجاور الأول V_2 من بين مجموعة البرامج المجاورة للبرنامج V_1 ($V_2 \in I(V_1)$) ذات الكلفة 13 دقيقة وذلك بتطبيق الإنشاء البحثي لمجموعة البرامج المجاورة المتتالية الذي تمّ شرحه في الجزء 8.3. تمّ الحصول على هذا البرنامج بإجراء عملية تبادل بين أول شعاعين U_{a-b} و U_{a-c} وإن الترتيب الجديد لهذه الأشعة مع الكلفة الناتجة كما يلي:

$$V_2 = (U_{a-c}) - [2] \rightarrow (U_{a-b}) - [1] \rightarrow (U_{a-d}) - [5] \rightarrow (U_{b-d}) - [4] \rightarrow (U_{c-d}) - [1] \rightarrow (U_{c-b}) = \{13\}$$



الشكل 11.4. منحى تطور عمليات البحث المحلي والعمليات الحسابية لطريقة التلدين التجريبي للجزي بي اس.

في هذه العملية التكرارية الثانية (**Iteration 2**)، إن قيمة الحل التقريبي الناتج 13 دقيقة وهي قيمة البرنامج الحالي V_2 . وإن قيمة التغير في تابع الكلفة $(\Delta = C(V_2) - C(V_1) = 13 - 17 = -4)$ أصغر من الصفر ($0 < \Delta$) وبالتالي فإن

طريقة التلدين التجريبي للجبي بي اس تقبل هذا الانتقال ذات الاتجاه نزولاً (down hill) أوتوماتيكياً ($\Delta < 0$) وتحسن البرنامج المجاور الناتج (V2) إلى البرنامج الحالي الجديد (V3) وفقاً للخطوة 6 في الشكل 5.4.

العملية التكرارية الثالثة

تتابع طريقة التلدين التجريبي عملها وتقوم بتشكيل البرنامج المجاور V3 من مجموعة البرامج المجاورة للبرنامج (V2) أي بتحقيق ($V3 \in I(V2)$) وذلك بتبادل الشعاعين Ua-d و Ua-b وفقاً للإنشاء البحثي لمجموعة البرامج المجاورة المتتالية وإعطاء الكلفة 14 دقيقة. وإعطاء الترتيب الناتج لهذا البرنامج كما يلي:

$$V3 = (Ua-d) - [2] \rightarrow (Ua-c) - [2] \rightarrow (Ua-b) - [5] \rightarrow (Ub-d) - [4] \rightarrow (Uc-d) - [1] \rightarrow (Uc-b) = \{14\}$$

في العملية التكرارية الثالثة (Iteration 3)، تقبل طريقة التلدين التجريبي الانتقال ذات الاتجاه صعوداً (Uphill Move) من البرنامج V2، والذي يمثل المثالية المحلية (Local Optimum)، إلى البرنامج V3 بكلفة مقدارها ($\Delta = C(V3) = 14$). إن هذا الانتقال ينتج ازدياداً في تابع الكلفة مقداره ($\Delta = C(V3) - C(V2) = 14 - 13 = +1$) أكبر من الصفر ($\Delta > 0$) وبالتالي فإن طريقة التلدين التجريبي لا توقف دورات البحث بل تتابع عملها وفقاً لمبدأ القبول الاحتمالي ($e^{-\Delta/T} > 0$) وتقبل البرنامج V3 بنسبة احتمالية وفقاً للمعادلة ($e^{-\Delta/T} = 0.779$). إن قيمة المتحول العشوائي ($\theta = 0.746$) أصغر من قيمة ($e^{-\Delta/T}$ أي $e^{-\Delta/T} > \theta$) وهذا يحقق مبدأ التحسين في طريقة التلدين التجريبي.

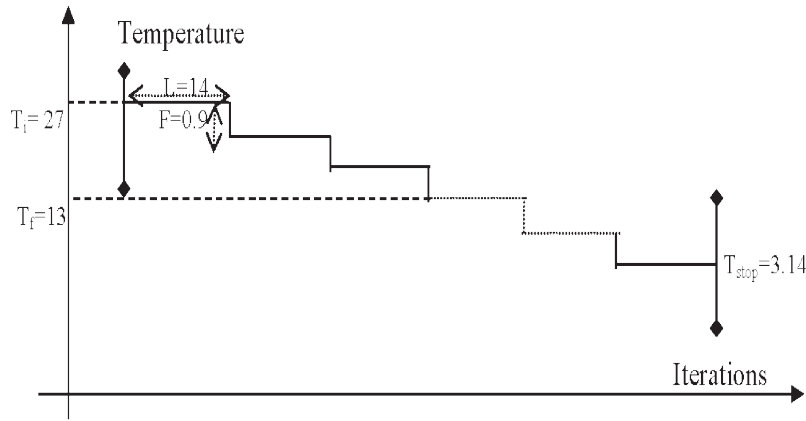
المرحلة التكرارية الرابعة عشرة

تمّ الحصول على البرنامج المجاور التالي V14 من مجموعة البرامج المجاورة للبرنامج V13 بتحقيق ($V14 \in I(V13)$) وتبادل الشعاعين Ua-d و Ua-b وإعطاء الكلفة 20 دقيقة. وإن الترتيب الناتج مع الكلفة كما يلي:

$$V14 = (Ua-b) - [4] \rightarrow (Ua-c) - [5] \rightarrow (Ub-d) - [4] \rightarrow (Ua-d) - [6] \rightarrow (Uc-d) - [1] \rightarrow (Uc-b) = \{20\}$$

إن قيمة التغير في تابع الكلفة ($\Delta = C(V14) - C(V13) = 20 - 13 = +7$) أكبر من الصفر ($\Delta > 0$) وبالتالي ترفض طريقة التلدين التجريبي هذا الانتقال ذات الاتجاه صعوداً وتحفظ بأفضل برنامج تمّ الحصول عليه V8. عند هذه المرحلة

التكرارية الرابعة عشرة (Iteration 14)، إن البرنامج الذي تمّ الحصول عليه تقريباً احتفظ بأفضل قيمة وهي 13 دقيقة لسبع عمليات تكرارية متتالية (الشرط المحدد لإيقاف عمل الطريقة) عند درجة حرارة التوقف ($T_{stop}=3.14$)، بينما ارتفعت قيمة البرنامج الحالي V14 إلى 20 دقيقة. إن القيمة المنخفضة لدرجة الحرارة ($T_{stop}=3.14$) تؤكد بأنه تمّ المرور على كافة المثاليات المحلية (Local Optima)، ولكن تمّ تجاوزها.



الشكل 12.4 عناصر التبريد وفقاً لمخطط التبريد الهندسي للشبكة في الشكل 4.7.

بتحقيق شرط إيقاف العمل، تتوقف العمليات التكرارية. تمّ الحصول على البرنامج القريب من المثالي بكلفة قيمتها 13 دقيقة وهي ذات القيمة لبرنامج مثالي معروف ومحسوب مسبقاً، وقد تمّ إنتاجه بثمان عمليات تكرارية وبزمن حسابي لا يتعدى بعض الثواني تقريباً. إن معامل التلدين الأساسية هي: درجة حرارة الإيقاف ($T_{stop}=3.14$)، طول سلسلة ماركوف ($L=14$)، وعامل التعديل ($F=0.9$) كما هو مبين في الشكل 4.12.

5.4 الاستنتاج

تمّ في هذا الفصل تطوير طريقة التلدين التجريبي للجبي بي اس التي تمّ تعديلها وتحليل مركباتها وحقت نتائج جيدة. تسمح هذه الطريقة والتي هي امتداد لطريقة البحث المحلي المتقارب أحياناً بقبول الانتقالات ذات الاتجاه صعوداً (Uphill Moves). بشكل محدد، تنتج هذه الطريقة في كل عملية

تكرارية مجموعة من البرامج المجاورة للحل الآني المعتمد. إذا كانت قيمة البرنامج المجاور أفضل من البرنامج السابق فإن طريقة التلدين التجريبي تنتقل إليه، عدا عن ذلك فتنقل إلى برنامج مجاور آخر بنسبة احتمالية وفقاً لمعادلة القبول الاحتمالي ($P = e^{-\Delta/T}$) التي تعتمد على التغير الناتج في قيمة تابع الكلفة Δ وعامل التحكم T القابل للتعديل. خلال مراحل عمليات التبريد، يتم تعديل درجة الحرارة ابتداء من قيمة عالية (والتي تنتج قيمة احتمالية عالية (P)) لانتقال ذات الاتجاه صعوداً (Uphill Move) وتتجه نحو الصفر مع ازدياد عدد العمليات التكرارية. في الفصلين 6 و7، سيتم دراسة واختبار تأثير التغير في المعامل الأخرى باستخدام شبكات فعلية وكبيرة. تمّ مراجعة البرامج المثالية المعروفة الناتجة باستخدام الطريقة الدقيقة وعرض طريقة التلدين التجريبي المطبّقة على الشبكات المساحية للجوي بي اس. تمّ شرح وتفصيل أفضل تصميم لطريقة التلدين التجريبي للجوي بي اس. إن التحقق من تأثير معامل التبريد على أداء طريقة التلدين التجريبي موضح في الفصول 6 و7 حيث إنه باستخدام شبكات كبيرة يمكن إجراء التحليل الشامل والمفيد لهذه المعاملات. وسيتم في الفصل التالي توصيف وشرح طريقة البحث المحظور وتطبيقها على نفس البيانات المستخدمة في هذا الفصل.