كلية الهندسة
قسم الهندسة المعلوماتية

مقرر خوارزميات بحث ذكية

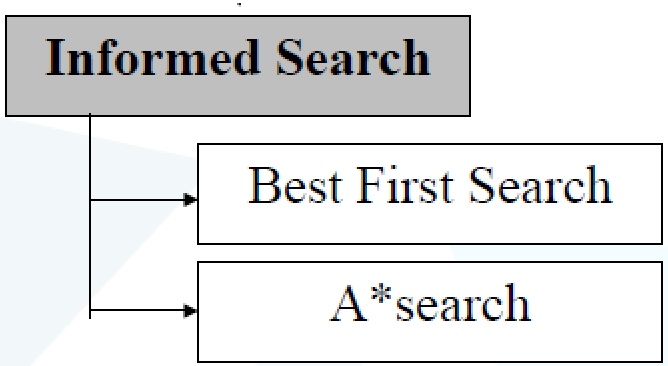
د. غزوان علي ريّا

محاضرات الأسبوع الخامس
الفصل الأول 2024–2025

البحث مع معلومات/البحث المعرفي Informed Search

1- خوارزمية البحث الجشعة التي تعتمد على مبدأ الأفضل أولاً Greedy best-first search

2- خوارزمية A^*



البحث مع معلومات/البحث المعرفي Informed Search:

لقد غطينا في القسم السابق العديد من استراتيجيات البحث التي تندرج تحت عنوان البحث بدون معلومات والذي يسمى أيضاً البحث الأعمى.

ويعني مصطلح البحث بدون معلومات أن الاستراتيجيات لا تحتوي على معلومات إضافية حول الحالات بخلاف تلك المقدمة في تعريف المشكلة.

كل ما يمكنها فعله هو إنشاء خلفاء وتمييز حالة الهدف عن حالة غير الهدف. تختلف جميع استراتيجيات البحث السابقة عن بعضها بالترتيب الذي يتم به توسيع العقد.

تدعى الاستراتيجيات التي تعرف ما إذا كانت حالة غير الهدف "واعدة أكثر more promising " من أخرى بالبحث المعرفي **informed search** أو استراتيجيات البحث الاستدلالية **heuristic search**.

يوضح هذا الفصل كيف يمكن لاستراتيجية البحث المعرفي **informed search** - تلك التي تستخدم المعرفة الخاصة بالمشكلة بما يتجاوز تعريف المشكلة نفسها - أن تجد حلولاً بكفاءة أكبر من الاستراتيجية العمياء.

النهج العام الذي نأخذه في الاعتبار يسمى البحث الأفضل أولاً **BEST-FIRST SEARCH**. البحث الأفضل أولاً هو مثال على خوارزمية البحث الشجري أو البحث البياني العام حيث يتم اختيار عقدة للتوسع بناءً على دالة التقييم EVALUATION FUNCTION، f(n). يتم تفسير **دالة التقييم على أنها تقدير للتكلفة، لذلك يتم توسيع العقدة ذات التقييم الأدنى أولاً.**

<u>إن تنفيذ البحث البياني الأفضل أولاً مماثل لذلك الخاص بالبحث ذي التكلفة الموحدة UCS، باستثناء استخدام f بدلاً من g لترتيب قائمة الأولويات.</u>

تابع التقدير: $$f(n) = g(n) + h(n)$$

حيث:

Evaluation Function f(n): تابع التقدير وهو التابع الذي يحدد لنا الخطوة التالية.

Real Cost g(n): وهي كلفة الطريق (وهي تكلفة الوصول <u>**إلى**</u> العقدة).

Heuristic Function h(n): الكلفة المتوقعة <u>**من**</u> العقدة n إلى العقدة الهدف.

نعتبر أن $h(n) = 0$ في حال كانت العقدة هي عقدة الهدف.

يحدد اختيار f استراتيجية البحث.

تتضمن معظم خوارزميات الأفضل أولاً دالة استدلالية تعتبر أحد مكونات f، يشار إليها بـ h(n)

h(n) = التكلفة المقدرة لأرخص مسار من الحالة المستهدفة إلى الحالة عند العقدة n.

على سبيل المثال، في مسألة رومانيا، قد يقدر المرء تكلفة أرخص مسار من مدينة أراد إلى مدينة بوخارست عبر المسافة المستقيمة من أراد إلى بوخارست.

<u>الدوال الاستدلالية</u> هي الشكل الأكثر شيوعًا الذي يتم فيه نقل <u>المعرفة الإضافية</u> للمشكلة إلى خوارزمية البحث. ندرس الاستدلالات بمزيد من العمق لاحقاً، في الوقت الحالي، نعتبرها دوالًا كيفية وغير سلبية ومحددة للمشكلة، مع قيد واحد:

إذا كانت n عقدة هدف، فإن $h(n) = 0$

يتناول الجزء المتبقي من هذا الفصل طريقتين لاستخدام المعلومات الاستدلالية لتوجيه البحث.

تدعى خوارزمية البحث مع معلومات أيضاً بالبحث الحدسي Heuristic Search والبحث المُوجَه Directed Search،

هذه الخوارزميات أكثر كفئاً، حيث يمكن الوصول لحالة الهدف عبر تابع حدسي Heuristic Function نستخدمه لنصل بأقل كلفة ممكنة،

ويقوم هذا التابع بتقدير المسافة المتبقية للهدف.

فخوارزميات البحث مع معلومات هي تطوير لعمليات البحث عن طريق استعمال الحدسيات Heuristics مع خوارزميات البحث التي تتعامل مع فضاء البحث لجعل الخوارزمية أفضل،

فالتابع الحدسي يحدد جودة أي حالة في فضاء البحث، و يؤدي استخدام هذا في بيان إلى استراتيجية توضح أي عقدة يجب توسعتها أولاً.

- فالحدسية **Heuristic** (أو الاستدلالية) هي أي طريقة يمكن أن تساعد في حل مسألة، تستخدم طريقة عملية ليست بالضرورة محسنة بالكامل أو متقنة ولكنها مع ذلك جيدة بما يكفي لتسريع عملية الحصول على حل مرضٍ، حيث تأخذ بالحسبان المعلومات حول المشكلة للمساعدة في عمليات البحث.

البحث المعرفي يعني استخدام معارف تخص المسألة (المشكلة) ليست موجودة في توصيف المسألة،

- على العكس، **<u>لا تستغل خوارزميات البحث الأعمى أي معلومات إضافية من أجل تحسين كفاءة البحث</u>**

تبحث خوارزميات البحث الأعمى عبر فضاء الحالة حتى الوصول إلى حل.

بطرائق البحث هذه فإن حل المعضلات الحقيقية قد يؤدي إلى انفجار حسابي (عدد الحالات الممكنة)،

❑ **<u>تستخدم خوارزميات البحث الحدسي Heuristic Search كل المعلومات المتاحة لجعل عملية البحث أكثر كفاءة.</u>**

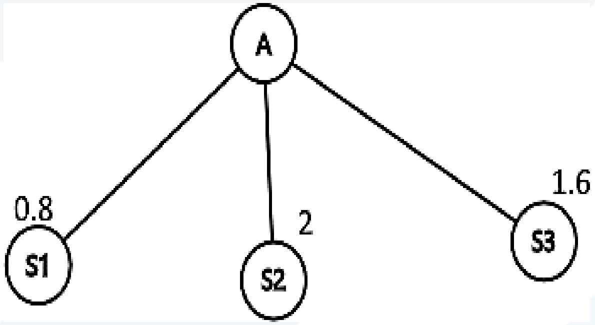
<u>المعلومات الحدسية هي قاعدة أو طريقة تؤدي إلى تحسين كفاءة عملية البحث.</u>

- يعتمد البحث المعرفي informed search على حساب تابع التقدير. يقيس تابع التقدير البعد عن الهدف. يتوجب بعدها اختيار العقدة التي تحصل على أفضل تقدير بما يؤدي إلى أنها العقدة التالية الأفضل في السعي للوصول إلى الهدف.
- يتم تحقيق ذلك من خلال استخدام قائمة نرتب فيها العقد ترتيباً تنازلياً وفقاً لدرجات أفضلياتها. **تم دراسة توابع تقدير مطورة وفقاً لاستراتيجيتي البحث الجشع greedy search والبحث وفق خوارزمية A*.**

يمكننا القول بأن التابع الحدسي هو تابع نستعمله في البحث مع معلومات/البحث المعرفي ويجد أكثر طريق يوجد منه أمل، فيأخذ الحالة الحالية للعميل كدخل ويولد تقدير عن مدى قرب العميل للهدف، ولكن هذه الطريقة الحدسية لا تعطي أفضل حل بالضرورة ولكنها مضمونة أن تجد حل جيد في وقت معقول، فيقدر التابع الحدسي مدى قرب الحالة للهدف ويحسب طريق أفضلي بين زوج من العقد وقيمته دائماً موجبة.

مثال:

يوضح البيان جانباً قيم التابع الحدسي لمجموعة من العقد (قيم التابع الحدسي تُوضع قرب العقدة) ستختار الطريقة المعرفية هنا أقل تكلفة للعقدة وبالتالي تختار العقدة s^1.



يمكن أن تخطئ الحدسية أو التجريبية Heuristic فتعطي تقدير أقل Underestimate أو أن تعطي تقدير أكبر Overestimate والحدسيات أو التجريبيات المقبولة هي التي يكون تقديرها أصغر من كلفتها الحقيقية.

فبالعموم تعتمد استراتيجيتي البحث مع معلومات على مايلي:

أولاً خوارزمية البحث الجشعة التي تعتمد على مبدأ الأفضل أولاً Greedy best-first search: تحقق الخاصية $f(n) = h(n)$ أي أن قيمة تابع التقدير هو عبارة فقط عن قيمة التابع الحدسي، أي لا تأخذ بعين الاعتبار تكلفة الوصول **إلى** العقدة انطلاقاً من عقدة البداية.

ثانياً خوارزمية A* **:** تحقق $f(n) = g(n) + h(n)$ أي أنها تأخذ بالاعتبار تكلفة الوصول **إلى** العقدة n انطلاقاً من عقدة البداية بالإضافة إلى الكلفة المتوقعة **من** العقدة n إلى العقدة الهدف.

وهذا هو الفرق الجوهري بين الاستراتيجيتين.

مقارنة بين خوارزميات البحث الأعمى وخوارزميات البحث الحدسي:

البحث الأعمى	البحث الحدسي
لدينا معرفة فقط عن العقد المكتشفة مسبقاً	يقوم بتقدير المسافة للحالة الهدف
لا توجد معرفة حول بعد أي نقطة عن الهدف	يرشد عمليات البحث باتجاه الهدف
	يميز الحالات الأقرب إلى الحالة الهدف والتي ليست بعيدة عنها

أنواع خوارزميات البحث مع معلومات (البحث المعرفي) هي:

البحث الجشع المعتمد مبدأ الأفضل أولاً Greedy Best-First Search،

A^* (A Star)،

تسلق الهضبة Hill Climbing،

التخمير المُحاكى Simulated Annealing،

البحث الشعاعي Beam Search،

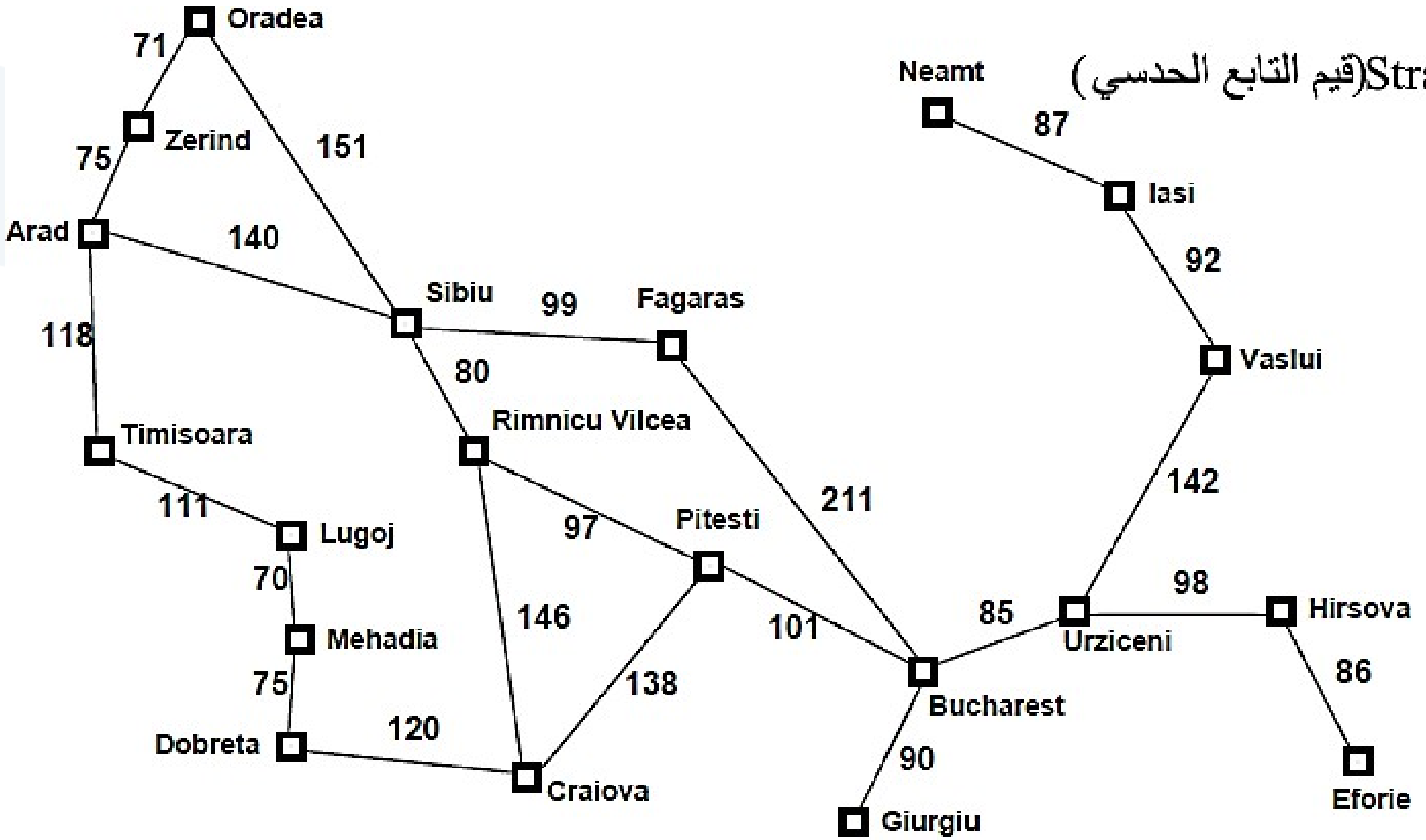
البحث الممنوع Tabu Search.

Greedy best-first search

تحاول عملية البحث الجشعة التي تعتمد على مبدأ الأفضل أولاً توسيع العقدة الأقرب إلى الهدف، على أساس أن هذا من المرجح أن يؤدي إلى حل سريع. وبالتالي، فهي تقيّم العقد باستخدام الدالة الإرشادية فقط؛ أي $f(n) = h(n)$

دعونا نرى كيف يعمل هذا بالنسبة لمشكلة إيجاد الطريق في رومانيا؛ نستخدم طريقة تحديد المسافة في خط مستقيم، والتي سنسميها h_{SLD}. إذا كان الهدف هو بوخارست، فنحن بحاجة إلى معرفة المسافات في خط مستقيم إلى بوخارست، والتي تظهر في الشكل التالي.

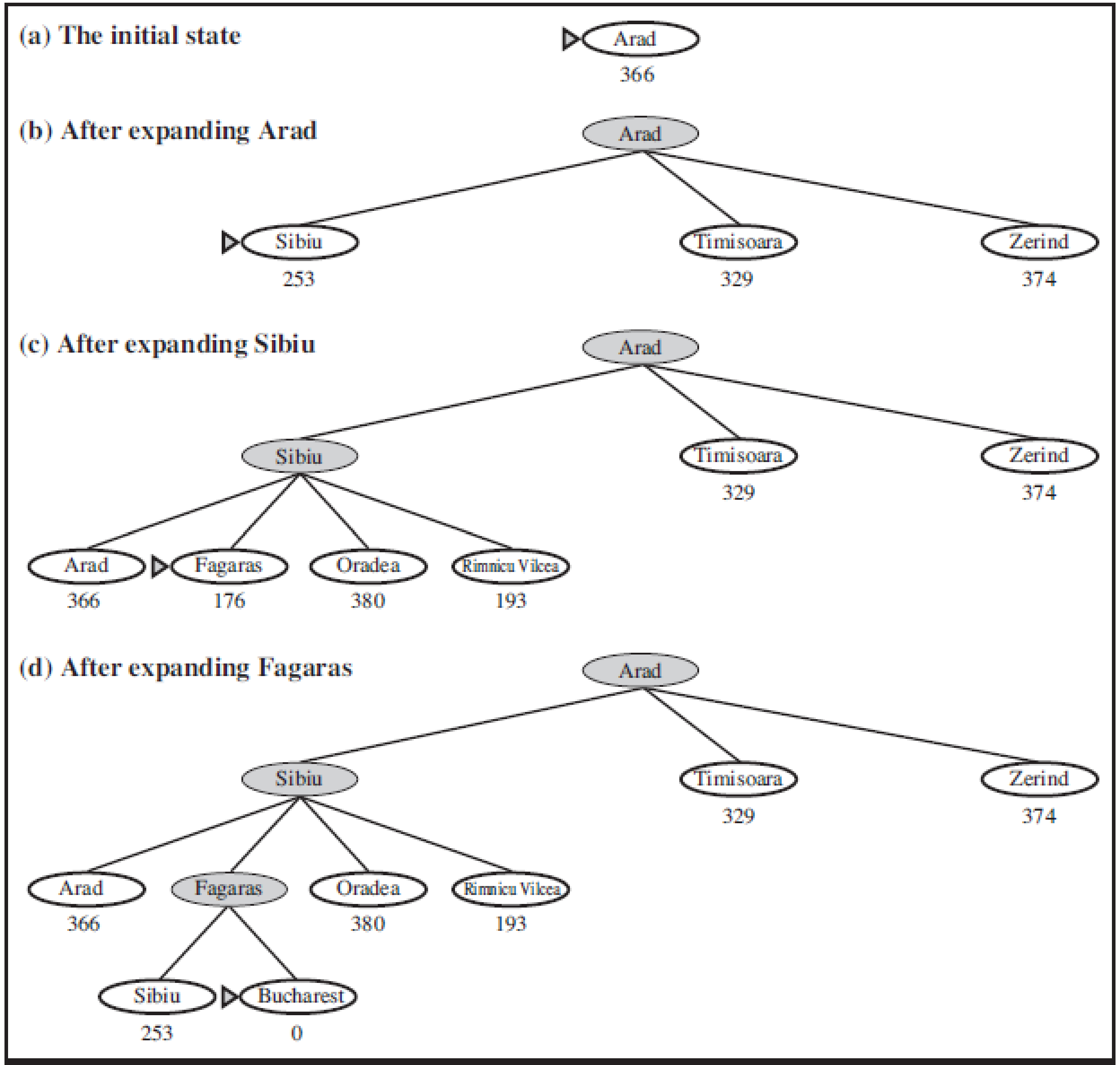
على سبيل المثال $h_{SLD}(In(Arad))=366$ لاحظ أنه لا يمكن حساب قيم h_{SLD} من وصف المشكلة نفسها. علاوة على ذلك، يتطلب الأمر قدراً معيناً من الخبرة لمعرفة أن h_{SLD} يرتبط بمسافات الطرق الفعلية، وبالتالي فهو طريقة تحديد مفيدة.



مسافة خط النظر Straight line distance(قيم التابع الحدسي)

Arad: 366
Bucharest: 0
Craiova: 160
Dobreta: 242
Eforie: 161
Fagaras: 178
Giurgiu: 77
Hirsova: 151
Lasi: 226
Lugoj: 244
Mehadia: 241
Meamt: 234
Oradea: 380
Pitesti: 98
Rimnicu Vilcea: 193
Sibiu: 253
Timisoara: 329
Urziceni: 80
Vaslui: 199
Zerind: 374

يوضح الشكل التالي تقدم البحث الجشع "الأفضل أولاً" باستخدام hSLD لإيجاد مسار من أراد إلى بوخارست. ستكون أول عقدة يتم توسيعها من أراد هي سيبيو لأنها أقرب إلى بوخارست من زريند أو تيميشوارا. ستكون العقدة التالية التي سيتم توسيعها هي فاجاراس لأنها الأقرب.

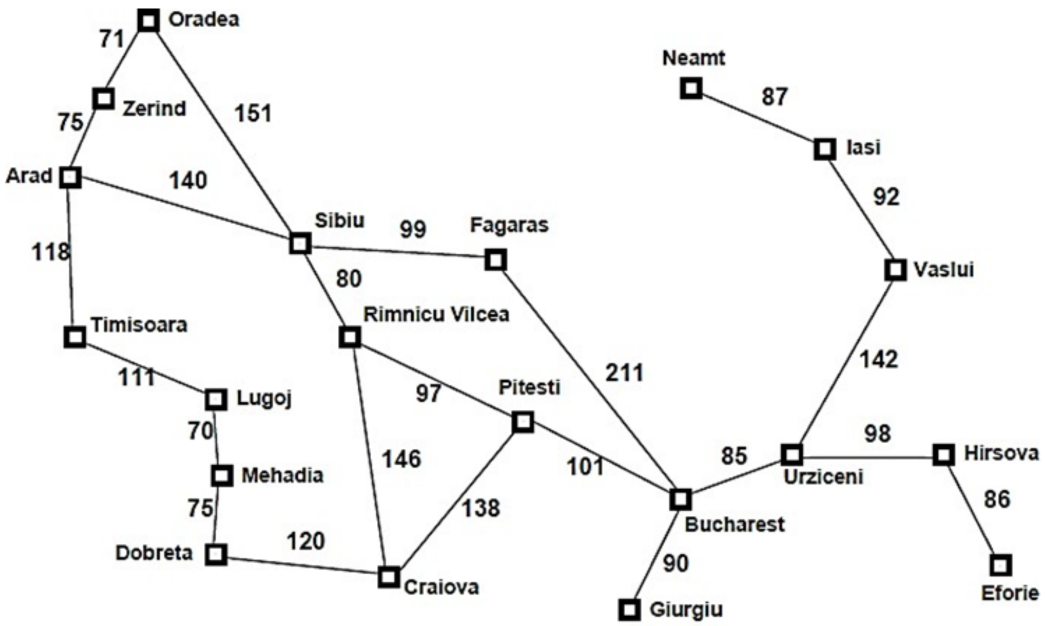


تولد فاجاراس بدورها بوخارست، والتي هي الهدف. بالنسبة لهذه المشكلة المعينة، يجد البحث الجشع "الأفضل أولاً" باستخدام hSLD حلاً دون توسيع عقدة ليست على مسار الحل على الإطلاق؛ وبالتالي، تكون تكلفة البحث ضئيلة. ومع ذلك، فهي ليست مثالية: المسار عبر سيبيو وفاجاراس إلى بوخارست أطول بمقدار 32 كيلومتراً من المسار عبر ريمنيكو فيلشيا وبيتستي. يوضح هذا سبب تسمية الخوارزمية "جشعة" - في كل خطوة تحاول الاقتراب من الهدف قدر الإمكان.

Stages in a greedy best-first tree search for Bucharest with the straight-line distance heuristic h_{SLD}. Nodes are labeled with their h-values.

إن البحث الجشع عن الشجرة وفق مبدأ الأفضل أولاً غير تام أيضاً حتى في فضاء الحالة المحدود، تماماً مثل البحث وفق مبدأ العمق أولاً.

ولنتأمل هنا **مشكلة الانتقال من ياسي إلى فاجاراس**. يقترح المنهج الاستدلالي أن يتم توسيع نيامت أولاً لأنه الأقرب إلى فاجاراس، ولكنه طريق مسدود .والحل هو الانتقال أولاً إلى فاسلوي ـ وهي خطوة أبعد في واقع الأمر عن الهدف وفقاً للمنهج الاستدلالي ـ ثم الاستمرار إلى أورزيسيني وبوخارست وفاجاراس .ولكن الخوارزمية لن تجد هذا الحل أبداً، لأن توسيع نيامت يعيد ياسي إلى الحدود، وياسي أقرب إلى فاجاراس من فاسلوي، وبالتالي سيتم توسيع ياسي مرة أخرى، مما يؤدي إلى حلقة لا نهائية) .



إنَّ أسوأ حالة من حالات التعقيد الزمني والمكاني لنسخة الشجرة هي $O(b^m)$، حيث m يمثل أقصى عمق لفضاء البحث. ولكن باستخدام دالة استدلالية جيدة، يمكن تقليل التعقيد بشكل كبير. تعتمد كمية التخفيض على المشكلة المحددة وعلى جودة الاستدلال.

وبالتالي يمكننا القول بأن خصائص البحث الجشع هي:

ليس تاماً not complete حيث أنه من الممكن أن يعلق في حلقة غير منتهية.

يحتاج **زمن** هو $O(b^m)$ ولكن استخدام تابع حدسي جيد يمكن أن يؤدي لتحسينات هائلة، يحتاج **مساحة** هي $O(b^m)$ فهو يحفظ جميع العقد في الذاكرة، **وليس أفضلياً not optimal**.

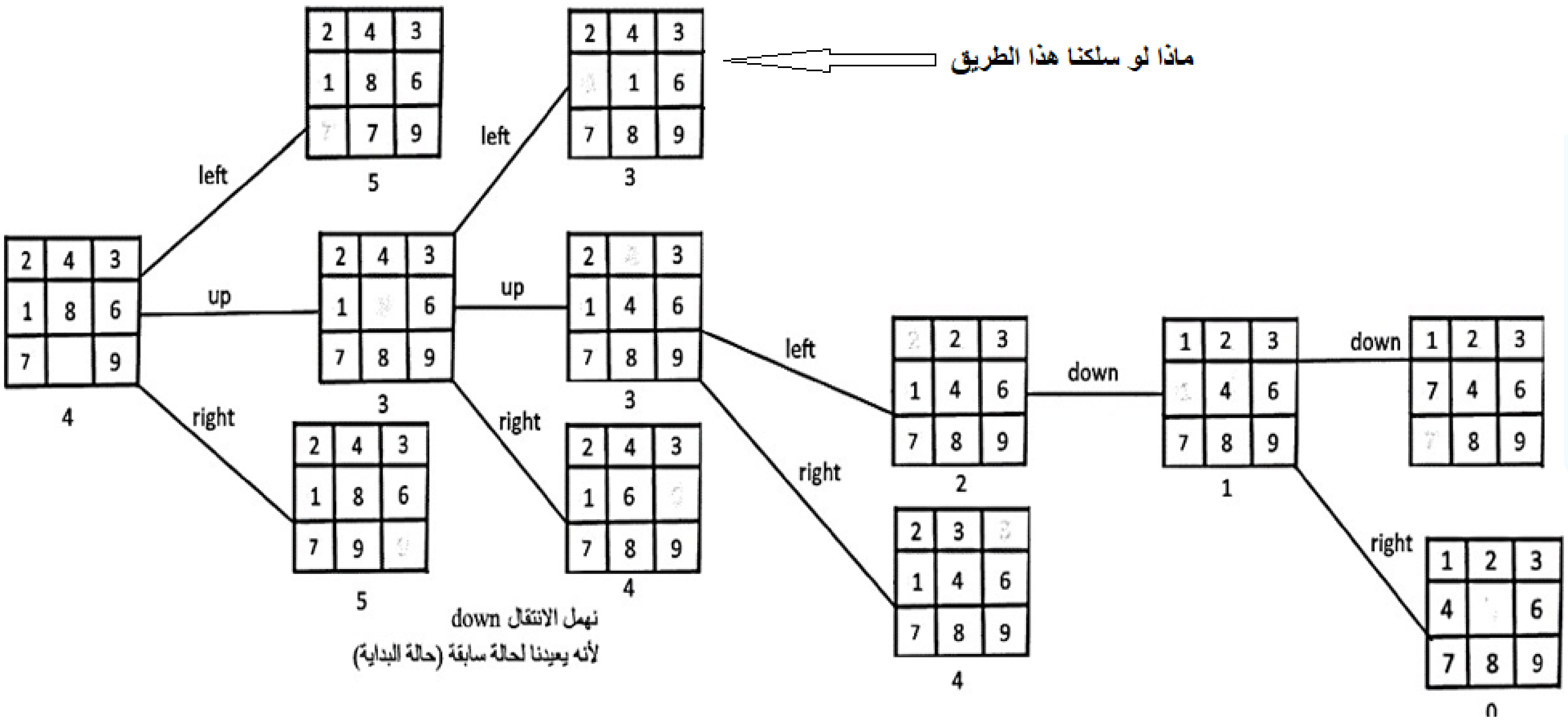
إستراتيجية البحث الجشع greedy search تخمن كل طريق واحد عبر التابع الحدسي h(n)، العقدة التي يتبادر أنها الأكثر قرباً من الهدف يكون لها أفضلية الاستكشاف، وبالتالي تخفض تكلفة الوصول إلى الهدف.

في مثال المربعات المنزلقة الثمانية التابع الحدسي هو عدد المربعات الموجودة في مكان غير صحيح. بينما في مثال رومانيا يمكن اعتبار أن التابع حدسي هو عبارة عن بعد يمثله خط مستقيم بين المدن (خط النظر).

ملاحظة:

هناك مسائل نقوم نحن باختيار التابع الحدسي فيها كما في المربعات المنزلقة ومسائل أخرى يكون التابع الحدسي معطى بها (كما في مثال رومانيا).

مثال توضح هذه المثال عملية اختيار الخوارزمية الجشعة للحالات في مسألة المربعات المنزلقة حيث أن قيم التابع الحدسي هي عدد المربعات التي ليست في مكانها الصحيح (مع إهمال الفراغ) فنقوم بتوسيع العقد التي تملك أقل عدد من المربعات التي ليست في مكانها الصحيح كما توضح الشجرة التالية.



كما توضح الشجرة السابقة نقوم **أولاً** بتوسيع الحالة التي تملك 3 مربعات في مكانها الغير مناسب والتي وصلنا اليها عبر تطبيق الانتقال up على الحالة البدائية للمسألة

وثم نرى أن هناك حالتان عدد المربعات التي ليست في مكانها المناسب هو 3 فنختار أحدهما (في هذا المثال اخترنا الانتقال up)

نقوم بتوسعتها ثم نختار الانتقال left الذي قادنا إلى حالة مربعين فقط بمكان خاطئ

نقوم بالتوسعة عبر الحالة الوحيدة الممكنة down وهنا أصبح هناك مربع فقط في مكان خاطئ نقوم بالتوسعة ومن ثم نختار أخيراً الانتقال right الذي يقودنا الى الحالة الهدف فنكون حصلنا على الحل والذي هو up up left down right.

- في خوارزمية البحث الجشع الذي يعتمد الأفضل أولاً يتم تقدير فضاء البحث عبر تابع حدسي يقدم معلومات حول اتجاه الوصول للهدف، فيقدم طريقة ليخمن أي من جيران العقدة سيؤدي للهدف.

- **طريقة Open Close**

نحفظ العقد التي لم نقدرها بعد في المجموعة Open والعقد التي تم تقديرها في المجموعة Closed، وتمثل المجموعة Open رتل أهمية priority queue بحيث أننا نزيل العقد التي لم تتم زيارتها من الرتل حسب ترتيب تابع تقديرهم f(n) (بشكل مشابه لرتل الأولية في خوارزمية UCS)،

- وهذا يجعل خوارزمية البحث الأفضل أولاً خوارزمية جشعة حسب المبدأ لأنها دائماً تختار أفضل فرصة محلية في المجموعة الأمامية للبحث (فكرة الفرصة المحلية يمكن تشبيهها بشخص يختار أن يترك المدرسة ويعمل بالرغم من أنه من الناحية قصيرة الأمد (الفرصة المحلية) سيحصل هذا الشخص على مقابل نقدي مباشرة مقارنة بإكماله الدراسة ولكن إكماله الدراسة بالرغم من عدم وجود مقابل مادي على المدى الطويل ستؤدي لنتائج أفضل بكثير من تركه الدراسة).

فالمجموعة الأمامية Frontier في البحث الأفضل أولاً هي رتل أولوية مرتب حسب قيم تابع التقدير f(n) وبما أنه هناك ترتيب صارم لقيم تابع التقدير فاختيار العقدة التي سيتم تقديرها (أي توسعتها وإضافة أولادها) لاحقاً هو جشع.

وباستخدام المجموعة Closed (لتجنب معاودة زيارة العقد وبالتالي نتفادى الحلقات) يجعل البحث الأفضل أولاً تاماً complete ولكنه ليس أفضلياً not optimal حيث أن الحل يمكن أن يؤدي لطريق أطول (كما في طريق يملك قيمة تابع تقدير h(n) أكبر من القيمة الصغرى ولكنه يملك كلفة g(n) أصغر من الحل الذي أوجدته خوارزمية البحث أولاً).

ملاحظة:

البحث حسب العرض أولاً BFS هو حالة خاصة من البحث الأفضل أولاً (عندما تكون كل كلف الوصلات متساوية) وبحث UCS هو حالة شبيهة عندما تكون كلفة تابع التقدير $f(n) = g(n)$.

قيمة التابع الحدسي لكل العقد $h(n) \geq 0$ وقيمة التابع الحدسي لعقدة هدف هي $h(n) = 0$ بينما إن كانت قيمة التابع الحدسي $h(n) = \infty$ هذا يعني أننا وصلنا لنهاية مسدودة Dead–End،

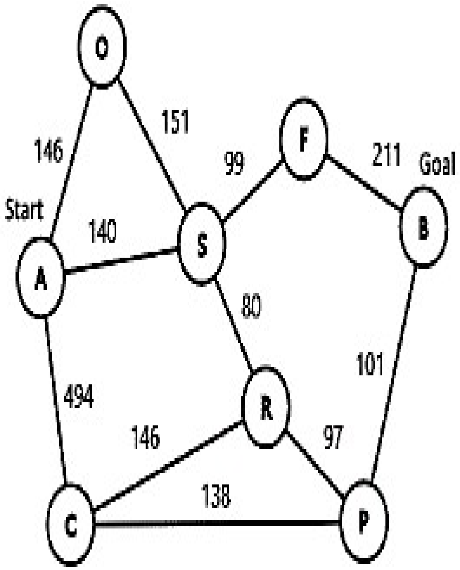
في النهاية هذه الخوارزمية تحقق الخاصية $f(n) = h(n)$ أي أن قيمة تابع التقدير هو عبارة فقط عن قيمة التابع الحدسي ما يجعلها جشعة.

خوارزمية البحث الأفضل أولاً هي كما يلي:

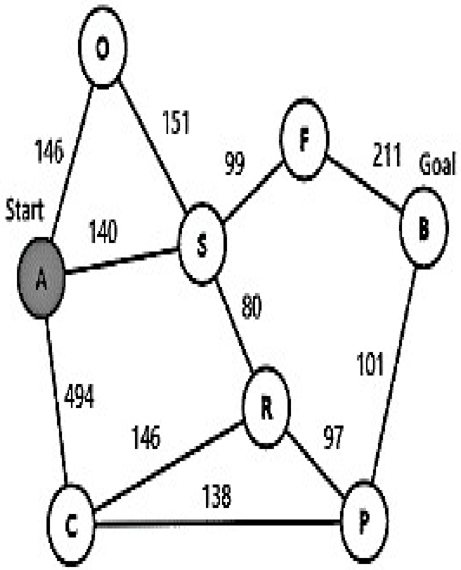
```
begin
open:= [Start]; %initialize
closed:= [];
while open ≠ [] do %states remaining
begin
   remove the leftmost state from open,
   call it X;
   if X=goal then return the path from Start to X
   else begin
      generate children of X;
      for each child of X do
         case
         the child is not on open or closed
         begin
            assign the child a heuristic value
            add the child to open
         end;
         the child is already on open
         if the child was reached by a shorter path then give the state on open the shorter path
         the child is already on closed
         if the child was reached by a shorter path then
         begin
            remove the child from closed;
            add the child to open
         end;
      end; %case
   put x on closed;
   reorder states on open by heuristic merit (best leftmost)
end;
return FAIL %open is empty
end.
```

تمرين:

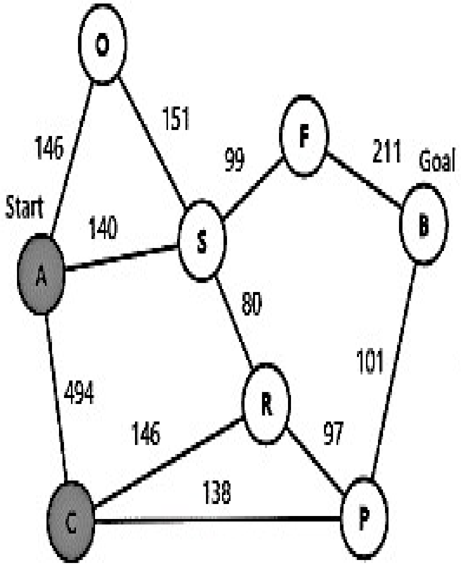
يمثل البيان التالي خريطة لمدينة، ونريد إيجاد طريق من المدينة A إلى المدينة B وليكن التابع الحدسي هو مسافة خط النظر كما يوضح الجدول المطلوب تطبيق خوارزمية البحث الأفضل أولاً على هذا البيان.



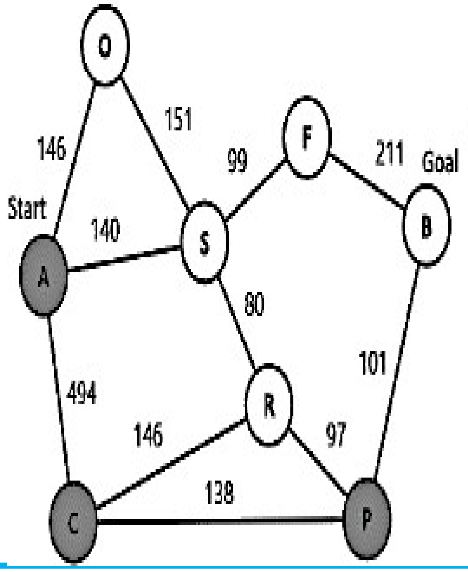
Node	H(n)
A	366
B	0
C	160
F	176
O	380
P	101
R	193
S	253



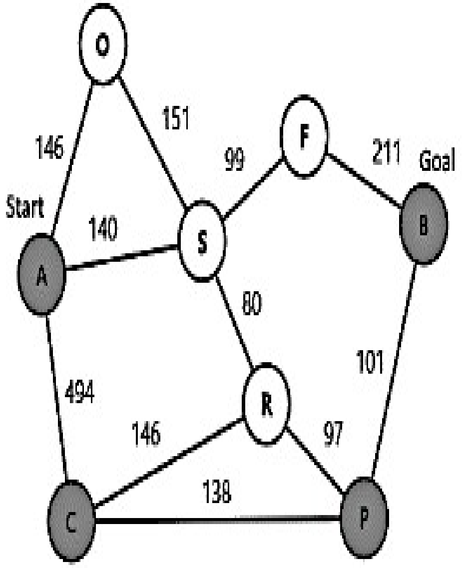
Node	H(n)
A	366
B	0
→C	160
F	176
O	380
P	101
R	193
S	253



Node	H(n)
A	366
B	0
C	160
F	176
O	380
→P	101
R	193
S	253



Node	H(n)
A	366
→B	0
C	160
F	176
O	380
P	101
R	193
S	253



Node	H(n)
A	366
B	0
C	160
F	176
O	380
P	101
R	193
S	253

في هذه الخوارزمية كلفة الوصلات لا تؤثر على الحل فسنقوم بإنشاء مجموعتين Open, Closed ونضع فيها العقد مع قيمة التابع الحدسي (لتسهيل الحل عند اختيار أصغر قيمة) نقوم بكل مرحلة بإضافة العقد الأبناء للعقدة الأولى (والتي تملك أصغر قيمة تابع حدسي) في رتل الأولية (ونرتب الرتل من أصغر قيمة للتابع الحدسي حتى أكبرها):

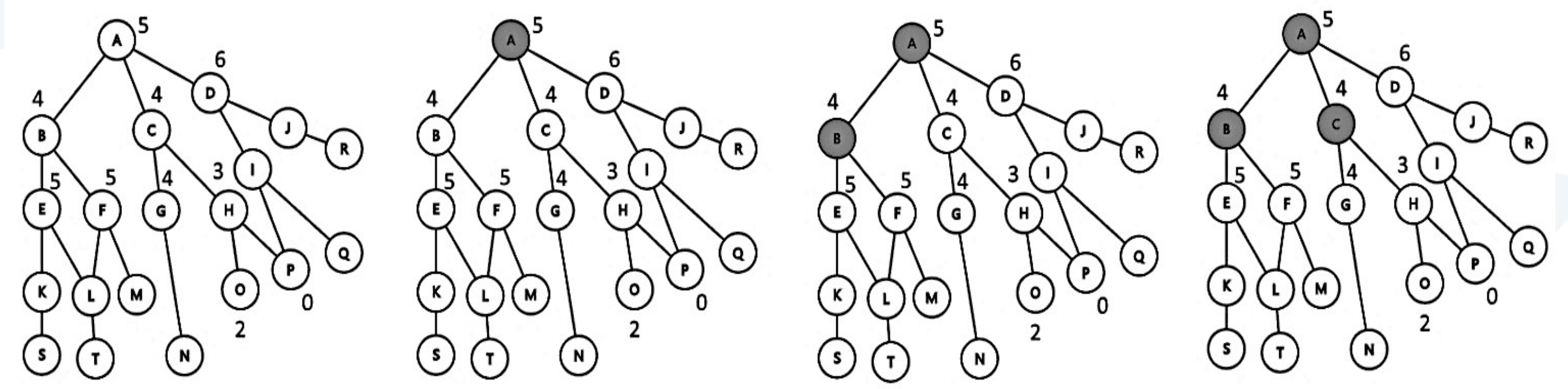
Open	Closed
A_{366}	-
$C_{160}\ S_{253}\ O_{380}$	A_{366}
$P_{101}\ R_{193}\ S_{253}\ O_{380}$	$C_{160}\ A_{366}$
$B_{0}\ R_{193}\ S_{253}\ O_{380}$	$P_{101}\ C_{160}\ A_{366}$
$R_{193}\ S_{253}\ O_{380}$	$B_{0}\ P_{101}\ C_{160}\ A_{366}$

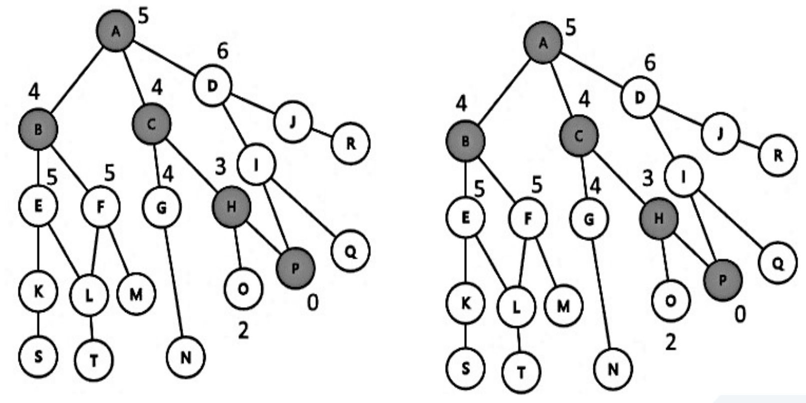
وصلنا لعقدة النهاية فيكون الحل A C P B وكلفة الحل $733 = 101 + 138 + 494$ وبشكل واضح هذا الحل ليس حلاً أفضلي.

كما لاحظنا في التمرين، كلفة الانتقال من العقدة الحالية للعقدة التالية لا تؤثر في اختيارنا للعقدة التالية، ويؤثر فقط التابع الحدسي الذي يعبر عن المسافة بين العقدة والعقدة الهدف، ولكن لو أمكننا أن نعتبر أن تابع التقدير هو مجموع التابع الحدسي والكلفة لحصلنا على نتائج مختلفة.

تمرين :

طبق خوارزمية البحث الجشع المعتمد على مبدأ الأفضل أولاً على هذا البيان.





Open	Closed
A_5	-
B_4 C_4 D_6	A_5
C_4 E_5 F_5 D_6	B_4 A_5
H_3 G_4 E_5 F_5 D_6	C_4 B_4 A_5
P_0 O_2 G_4 E_5 F_5 D_6	H_3 C_4 B_4 A_5
O_2 G_4 E_5 F_5 D_6	P_0 H_3 C_4 B_4 A_5

بما أن قيمة التابع الحدسي لآخر عقدة هي الصفر، فهذا يعني بأننا وصلنا للعقدة الهدف والطريق هو A B C H P.

A* search: Minimizing the total estimated solution cost

الشكل الأكثر شهرة للبحث الأفضل أولاً يسمى بحث A * Search (يُنطق "بحث A-star) فهو يقيّم العقد من خلال الجمع بين g(n)، وهي تكلفة الوصول إلى العقدة، وh(n)، وهي تكلفة الانتقال من العقدة إلى الهدف:

$$f(n) = g(n) + h(n).$$

ونظرًا لأن g(n) يعطي تكلفة المسار من العقدة الأولية إلى العقدة n، و h(n) هي التكلفة المقدرة لأرخص مسار من n إلى الهدف، فإن لدينا

f(n) هي التكلفة المقدرة لأرخص حل عبر n

وبالتالي، إذا كنا نحاول إيجاد الحل الأرخص، فإن الشيء المعقول الذي يجب تجربته أولاً هو العقدة ذات أقل قيمة لـ g(n) + h(n)

اتضح أن هذه الاستراتيجية أكثر من مجرد معقولة: بشرط أن تلبي الدالة الاستدلالية h(n) شروطًا معينة، فإن بحث A* يكون كاملاً ومثاليًا.

الخوارزمية مطابقة لبحث UCS باستثناء أن A * يستخدم g + h بدلاً من g

شروط المثالية: القبول والاتساق Admissibility and consistency

الشرط الأول الذي نطلبه لتحقيق المثالية هو أن تكون $h(n)$ طريقة مقبولة: الطريقة المقبولة هي التي لا تبالغ أبدًا في تقدير تكلفة الوصول إلى الهدف،

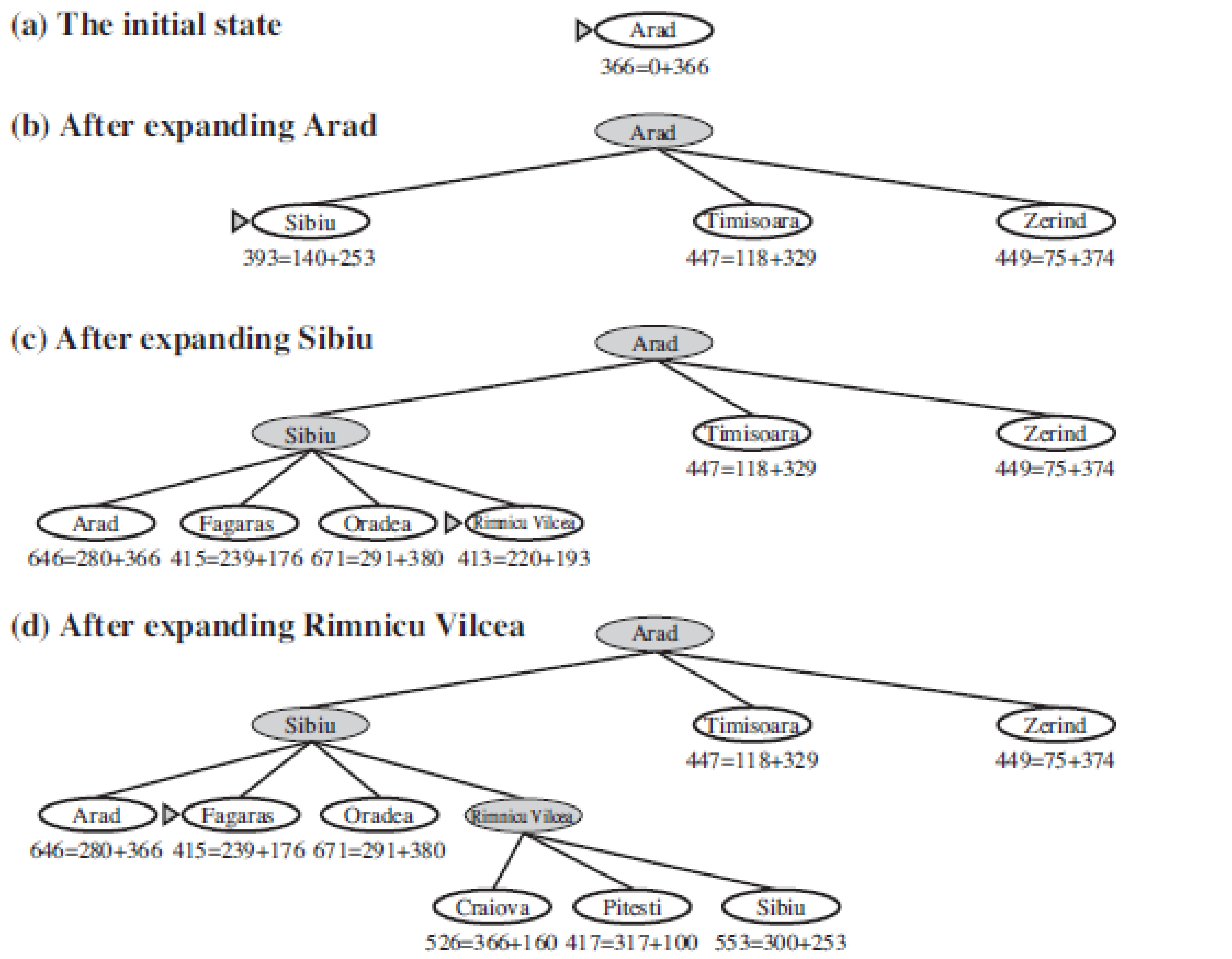
ولأن $g(n)$ هي التكلفة الفعلية للوصول إلى n على طول المسار الحالي، و$f(n)=g(n) + h(n)$، فلدينا نتيجة مباشرة مفادها أن $f(n)$ لا تبالغ أبدًا في تقدير التكلفة الحقيقية للحل على طول المسار الحالي عبر n.

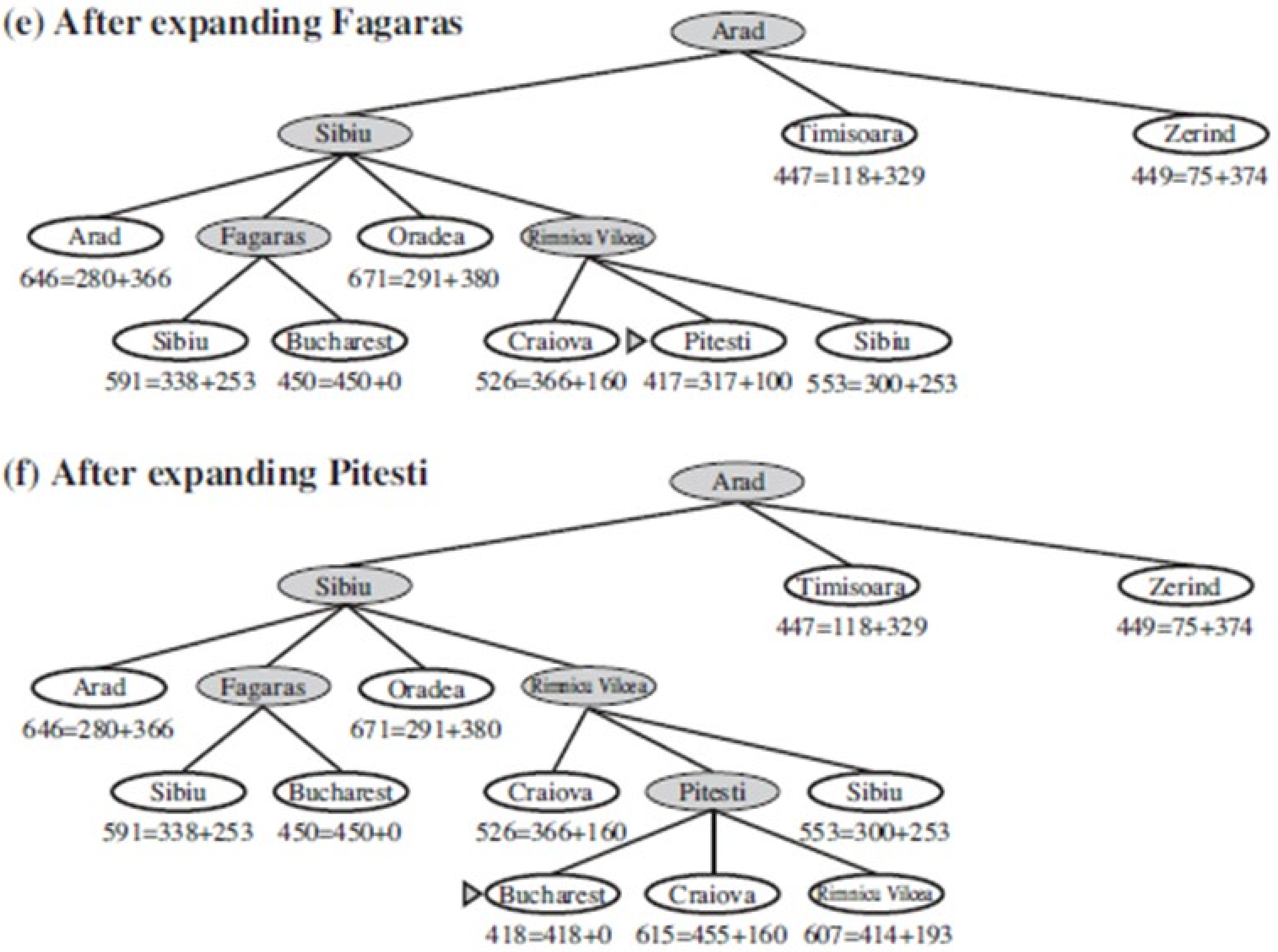
الطرق المقبولة متفائلة بطبيعتها لأنها تعتقد أن تكلفة حل المشكلة أقل مما هي عليه بالفعل. ومن الأمثلة الواضحة على الطرق المقبولة المسافة المستقيمة h_{SLD} التي استخدمناها للوصول إلى بوخارست. المسافة المستقيمة مقبولة لأن أقصر مسار بين أي نقطتين هو خط مستقيم، وبالتالي لا يمكن أن يكون الخط المستقيم تقديراً مبالغاً فيه.

في الشكل التالي، نوضح تقدم البحث في شجرة A^* عن بوخارست. يتم حساب قيم g من تكاليف الخطوة في الشكل الموجود في الشريحة 15، ويتم إعطاء قيم h_{SLD} في الجدول الموجود في الشكل نفسه،

لاحظ على وجه الخصوص أن بوخارست تظهر أولاً على الحدود في الخطوة (e)، لكنها لم يتم اختيارها للتوسع لأن تكلفة f الخاصة بها 450 أعلى من تكلفة Pitesti (417)

طريقة أخرى لقول هذا هي أنه قد يكون هناك حل من خلال Pitesti بتكلفة منخفضة تصل إلى 417، وبالتالي لن تستقر الخوارزمية على حل يكلف 450


(a) The initial state
Arad
366=0+366
(b) After expanding Arad
Arad
Sibiu
393=140+253
Timisoara
447=118+329
Zerind
449=75+374
(c) After expanding Sibiu
Arad
Sibiu
Timisoara
447=118+329
Zerind
449=75+374
Arad
646=280+366
Fagaras
415=239+176
Oradea
671=291+380
Rimnicu Vilcea
413=220+193
(d) After expanding Rimnicu Vilcea
Arad
Sibiu
Timisoara
447=118+329
Zerind
449=75+374
Arad
646=280+366
Fagaras
415=239+176
Oradea
671=291+380
Rimnicu Vilcea
Craiova
526=366+160
Pitesti
417=317+100
Sibiu
553=300+253



Stages in an A* search for Bucharest. Nodes are labeled with $f = g + h$.

هناك شرط ثانٍ أقوى قليلاً يسمى الاتساق (أو أحيانًا الرتابة) مطلوب فقط لتطبيقات *A على البحث البياني.

تكون القاعدة $h(n)$ متسقة إذا كان:

من أجل كل عقدة n وكل خلف n' لـ n ناتج عن أي إجراء a

يجب أن تكون التكلفة المقدرة للوصول إلى الهدف من n، لا تزيد عن مجموع تكلفة الوصول إلى n' انطلاقاً من n إضافةً إلى التكلفة المقدرة للوصول إلى الهدف من n'

$$h(n) \leq c(n, a, n') + h(n')$$

هذا شكل من أشكال قاعدة المثلث العامة، والتي تنص على أن كل ضلع من أضلاع المثلث لا يمكن أن يكون أطول من مجموع الضلعين الآخرين .

هنا، يتكون المثلث من n و n' والهدف Gn الأقرب إلى n والقاعدة منطقية تمامًا:

إذا كان هناك طريق من n إلى Gn عبر n' أرخص من $h(n)$، فإن ذلك من شأنه أن ينتهك الخاصية التي تنص على أن $h(n)$ هو الحد الأدنى لتكلفة الوصول إلى Gn

من السهل إلى حد ما أن نظهر أن كل قاعدة متسقة مقبولة أيضًا. لذلك فإن الاتساق هو متطلب أكثر صرامة من القبول. كل القواعد الاستدلالية المقبولة التي نناقشها في هذا الفصل متسقة أيضًا. على سبيل المثال h_{SLD} نحن نعلم أن متباينة المثلث العامة تتحقق عندما يتم قياس كل ضلع بمسافة الخط المستقيم وأن المسافة المستقيمة بين n وn' ليست أكبر من $c(n, a, n')$. وبالتالي، فإن h_{SLD} هي قاعدة استدلالية متسقة.

*A هي نفس خوارزمية البحث الأفضل أولاً ولكن تابع التقدير هو عبارة عن قيمة التابع الحدسي وكلفة الوصلة وخوارزميتها كمايلي:

1. Put the start node s in Open
2. If open is empty exit with failure
3. Remove node from open and place in Closed a node n for which f(n) is minimum
4. If n is a goal node exit with the solution obtained by tracing back pointers from n to s
5. Expand n generation all of its successors

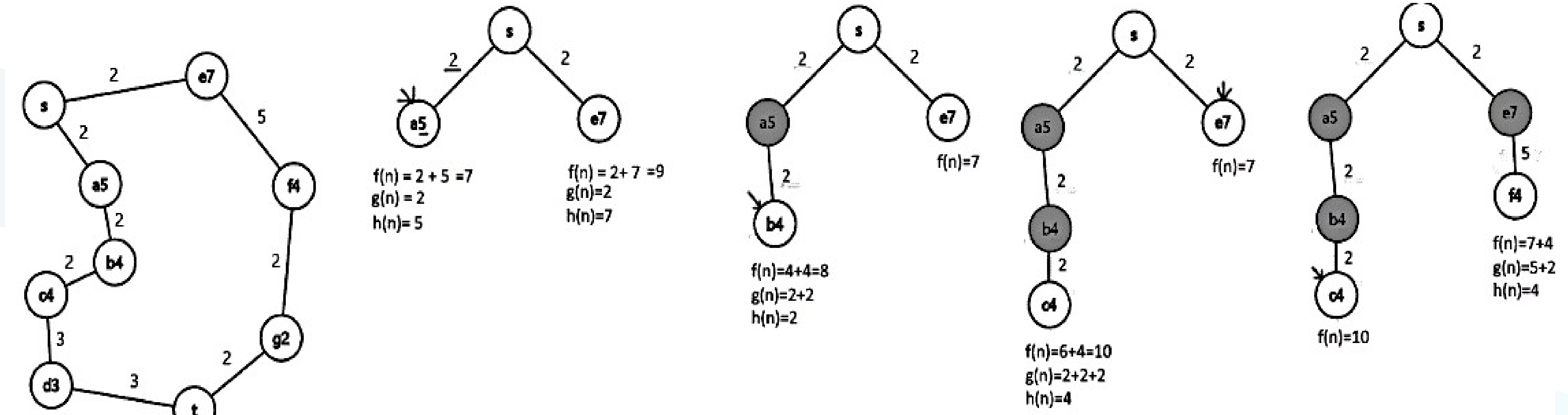
for each successor n′ of n:

a. Compute g′(n′);

Compute f′(n′)=g′(n′)+h′(n′)

a. If n′ is already on Open or Closed and g′(n′)<g(n′) let g(n′)=g′(n′)let f(n′)=f′(n′) redirect the pointer from n′ to n and if n′ is on Closed move it to Open
b. If n′is neither on Open nor on Closed let f(n′)=f′(n′) attach a pointer from n′ to n and place n′ on open

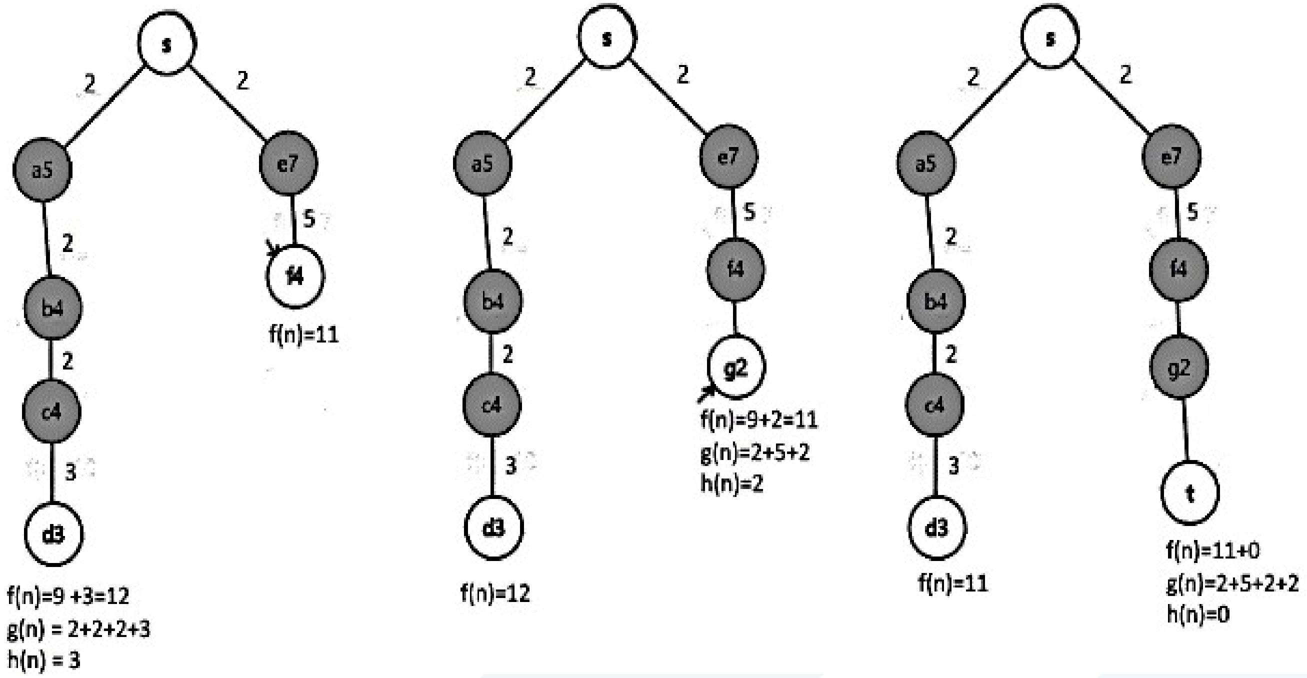
1. Go to 2

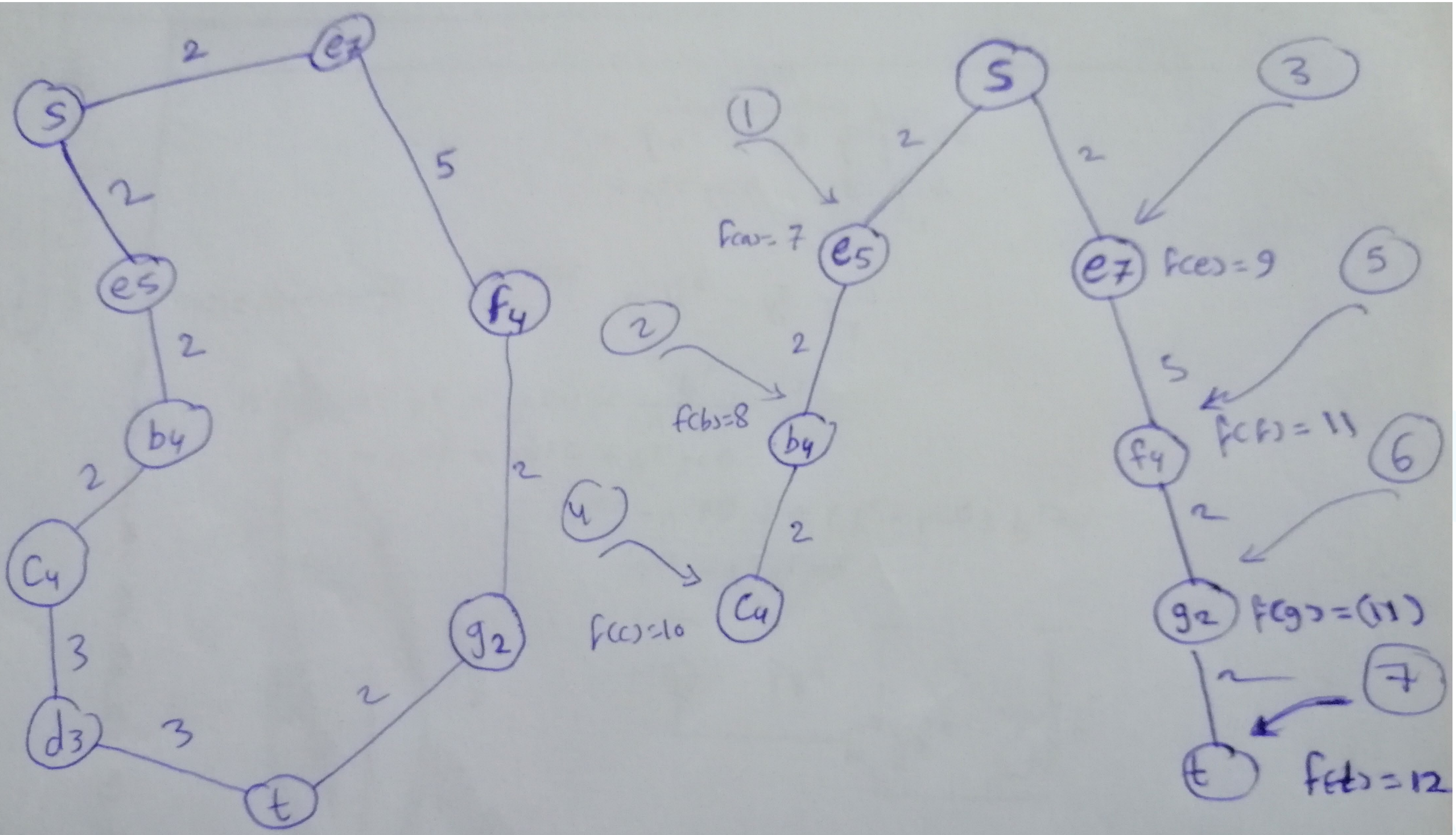


سنقوم بشرح الخوارزمية بشكل أفضل من خلال التمارين التالية:

تمرين :

طبق خوارزمية A^* على البيان التالي علماً أن عقدة البداية هي s وعقدة النهاية هي t.





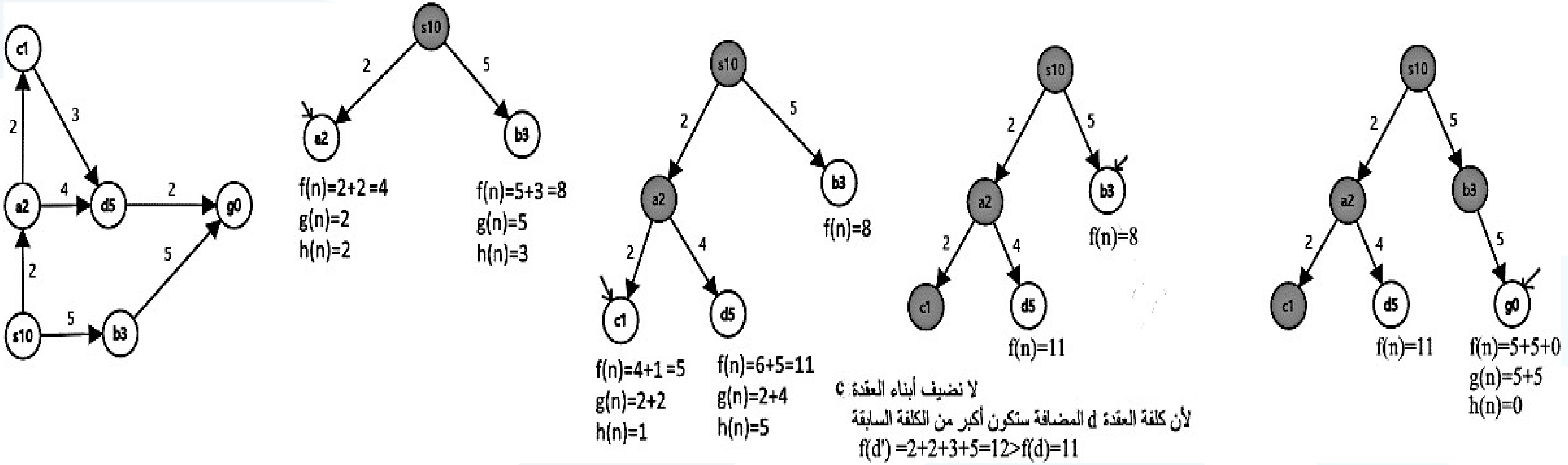
الحل هو s e f g t بكلفة: 2+5+2+2=11

نقوم في أول خطوة بإضافة عقدة البداية ثم نقوم بحساب f(n) أي أننا نجمع مجموع كلف الوصلات التي سلكناها للوصول للعقدة g(n) مع قيمة التابع الحدسي h(n) للعقدة (والذي هو الرقم داخل العقدة) وكما هو مبين في الخطوات لا نجمع القيم السابقة للعقد بالنسبة للتابع الحدسي إنما فقط قيمة التابع الحدسي للعقدة نفسها

والحل في هذا المثال هو s e f g t وكلفته هي $11 = 2 + 2 + 5 + 2$ (مجموع أوزان الوصلات).

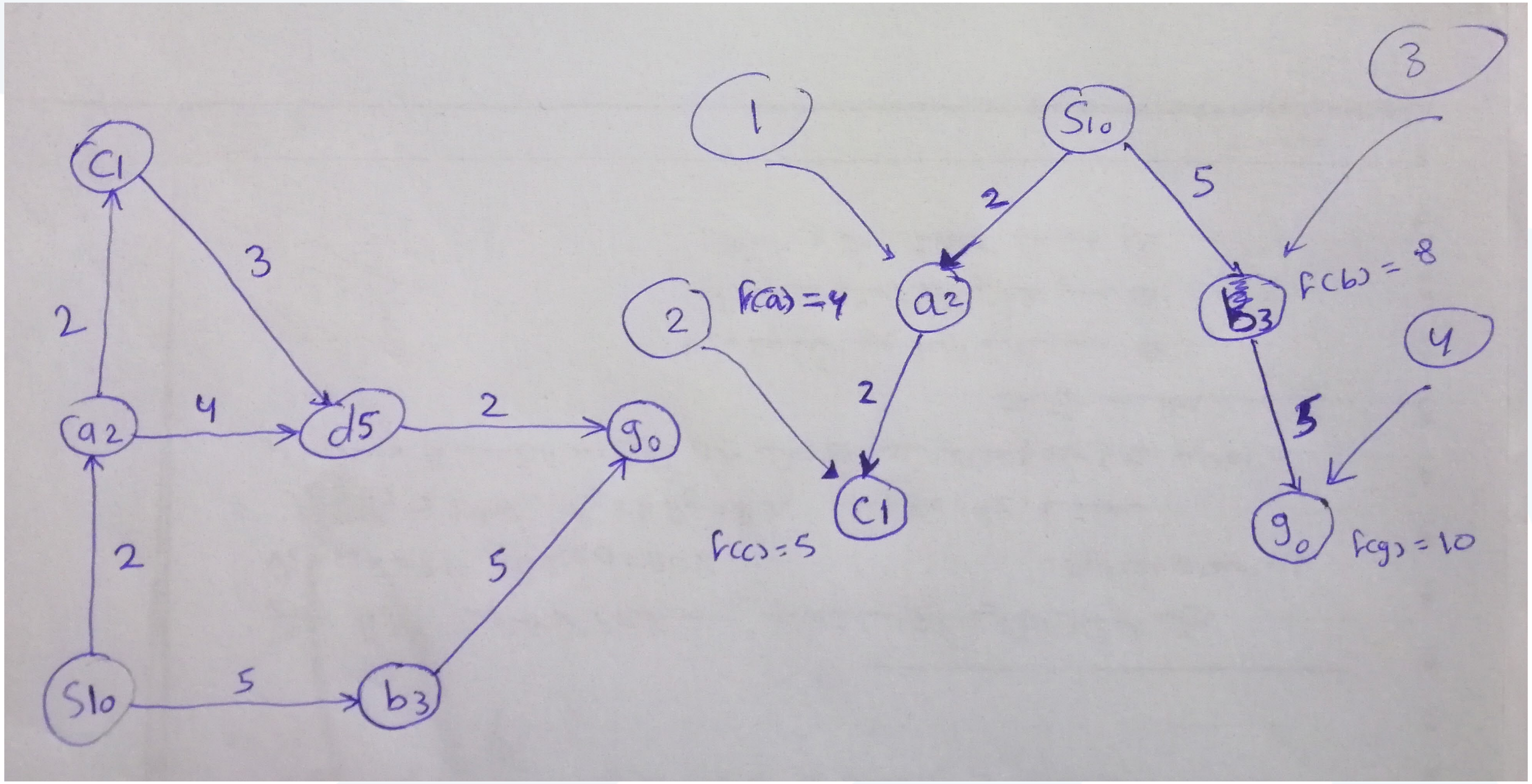
تمرين :

طبق خوارزمية A^* على البيان التالي باعتبار عقدة البداية هي s وعقدة النهاية هي t.



الجدير بالذكر أن قيمة تابع التقدير لعقدة البداية لا تؤثر في الحل وكما نلاحظ الحل g b s الذي أوجدته الخوارزمية ليس حلاً أفضلياً حيث أن كلفته (نأخذ فقط أوزان وصلات الطريق) هي $10 = 5 + 5$ بينما الحل الأفضلي هو g d a s بكلفة $8 = 2 + 4 + 2$.

من ناحية القبول Admissibility نعتبر أن الاجتهاد جدير بالقبول إن لم تتجاوز الكلفة الحقيقية الكلفة التقديرية للوصول للهدف.



المطلوب حل المسائل السابقة باستخدام طريقة Open – Close مع استنتاج شجرة *A المكافئة